



Ricardo Jorge Galambas Mendonça
Licenciado em Ciências da Engenharia Física

Desenvolvimento de um Sistema para a Medição do Efeito Piezoelétrico

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Física

Co-orientadores: Paulo António Martins Ferreira Ribeiro,
Prof. Auxiliar, Universidade Nova de
Lisboa

Maria de Fátima Guerreiro da Silva Cam-
pos Raposo, Prof. Associada com Agre-
gação, Universidade Nova de Lisboa

Júri

Presidente: Doutor Filipe Alexandre Ferreira Tiago de Oliveira
Arguente: Doutor João Miguel Pinto Coelho
Vogal: Doutor Paulo António Martins Ferreira Ribeiro



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2019

Desenvolvimento de um Sistema para a Medição do Efeito Piezoelétrico

Copyright © Ricardo Jorge Galambas Mendonça, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Dedicado aos meus pais

AGRADECIMENTOS

Aos meus co-orientadores, o Professor Doutor Paulo Ribeiro e a Professora Doutora Maria de Fátima Raposo, pela oportunidade de realizar esta dissertação e pela orientação, total disponibilidade e apoio que sempre demonstraram.

À Professora Doutora Susana Sério, na preparação dos filmes finos de alumínio por evaporação térmica e pela disponibilização do laboratório.

Às oficinas do Departamento de Física, especialmente ao Senhor Faustino, pela fabricação das peças mecânicas utilizadas.

Ao Laboratório de Instrumentação, especialmente ao Senhor Mesquita, pela ajuda e fornecimento de algum equipamento eletrónico.

A todos os meus amigos e colegas de curso que me acompanharam e ajudaram durante esta longa jornada.

A toda a minha família, especialmente à minha Mãe, ao meu Pai e ao meu Irmão, pela oportunidade e pelo apoio incondicional.

RESUMO

Foi desenvolvido um sistema para a medição do efeito piezoelétrico que se baseia numa técnica de interferometria ótica que mede a diferença de fase, originada pelo efeito piezoelétrico inverso, entre dois ramos de um interferómetro de Michelson. O sistema foi calibrado medindo-se, de duas formas distintas, o coeficiente piezoelétrico d_{33} de dois cristais comerciais de titanato zirconato de chumbo, abreviado como PZT, classificados como duros. O método de medição manual consiste na aplicação duma alta tensão ao cristal, de forma gradual, e verificar quanto é que o cristal expande através da observação do deslocamento das franjas de interferência. O método de medição automático consiste em, por um lado, aplicar uma tensão baixa ao cristal à frequência de 2,5 kHz através de um amplificador *lock-in*, medir o sinal piezoelétrico a essa mesma frequência, ao mesmo tempo que se faz deslocar as franjas de interferência a uma frequência muito baixa. O valor obtido experimentalmente para um dos cristais foi de $(160 \pm 20) \times 10^{-12}$ m/V pelo método manual e de $(164 \pm 2) \times 10^{-12}$ m/V pelo método automático e o para o outro cristal foi de $(170 \pm 10) \times 10^{-12}$ m/V pelo método manual e de $(148 \pm 6) \times 10^{-12}$ m/V pelo método automático. Estes valores encontram-se dentro do intervalo do valor esperado, 155×10^{-12} m/V e por isso, validam o sistema desenvolvido no que diz respeito à medição do efeito piezoelétrico. A bancada ótica revelou também estabilidade suficiente no que diz respeito ao ruído ambiente. Este sistema será no futuro utilizado para a medição de coeficientes piezoelétricos em filmes finos poliméricos.

Palavras-chave: Ótica, Efeito Piezoelétrico, Coeficiente Piezoelétrico, Interferometria, Interferómetro de Michelson, PZT.

ABSTRACT

A piezoelectric effect measurement system has been developed that is based on an optical interferometry technique that measures the phase difference, generated by the inverse piezoelectric effect, between two arms of a Michelson interferometer. The system was calibrated by measuring, in two different methods, manual and automatic, the piezoelectric coefficient d_{33} of two commercial crystals of lead zirconate titanate, abbreviated as PZT, classified as hard. The manual measurement method consisted of gradually applying a high voltage to the crystal and checking how much the crystal expands by observing the shift of the interference fringes. The automatic measurement method consisted on the one hand of applying an alternated low voltage to the crystal at a frequency of 2,5 kHz and to measure the piezoelectric signal by means of a lock-in amplifier, at the same time that the interference fringes are swiped at very low frequency. The piezoelectric coefficient values experimentally obtained for one of the crystals was $(160 \pm 20) \times 10^{-12}$ m/V by the manual method and $(164 \pm 2) \times 10^{-12}$ m/V by the automatic method and for the other crystal was $(170 \pm 10) \times 10^{-12}$ m/V by the manual method and $(148 \pm 6) \times 10^{-12}$ m/V by the automatic method. These values are within the expected range for these crystals, 155×10^{-12} m/V which therefore indicates that the developed system complies. The optical bench has also shown enough stability regarding ambient noise. This system will be used in the future for the measurement of piezoelectric coefficients in polymeric thin films.

Keywords: Optics, Piezoelectric Effect, Piezoelectric Coefficient, Interferometry, Michelson Interferometer, PZT

ÍNDICE

1	Introdução	1
2	Efeito Piezoelectrico	3
2.1	Estrutura Cristalina e Classes dos Materiais	3
2.2	Ferroelectricidade.....	4
2.3	Polarização	5
2.4	Piezoelectricidade	6
2.5	Coeficiente Piezoelectrico.....	9
3	Medição do coeficiente piezoelectrico.....	11
3.1	Método quase-estático.....	11
3.2	Microscopia de Força Piezoelectrica	12
3.3	Interferometria Ótica.....	13
4	Implementação do sistema de medição de coeficiente piezoelectrico	19
4.1	Interferómetro Desenvolvido	19
4.1.1	Laser	21
4.1.2	Divisor de feixe	21
4.1.3	Suporte dos espelhos	22
4.1.4	Porta amostras	22
4.1.5	Espelho vibrante.....	23
4.1.6	Detetor.....	24
4.2	Eletrónica Desenvolvida	25
4.2.1	Oscilador	25
4.2.2	Integrador	28
4.3	Otimização e Calibração do Interferómetro	29
4.3.1	PZT.....	30
4.3.2	Deposição de alumínio por evaporação térmica.....	31

4.3.3	Medição do efeito piezoelétrico através do método manual	34
4.3.4	Medição do efeito piezoelétrico através do método automático	35
4.4	Resultados	37
4.4.1	Método Manual	38
4.4.2	Método Automático.....	40
5	Conclusões e Perspetivas Futuras	43
	Bibliografia	45
	Anexo	49
	Apêndice	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Organização das propriedades eletroativas em relação às estruturas cristalinas e químicas dos materiais (adaptado de [2]).	3
Figura 2.2 – Ciclo de histerese polarização–campo elétrico (P - E). Inicialmente o material encontra-se na situação associada ao ponto A onde não está polarizado nem é sujeito a nenhum campo elétrico. À medida que o campo elétrico é aplicado de certa forma, a polarização induzida manifesta-se e o material descreve um ciclo representado pela sequência A-B-C-D-E-F-G (adaptado de [3]).	4
Figura 2.3 – Ciclo de histerese deformação - campo elétrico. De um modo ideal, à medida que um material é sujeito a um campo elétrico, deforma-se originando uma histerese que se assemelha aos contornos de uma borboleta seguindo a sequência A-B-C-D-E-F-G (adaptado de [5]).	5
Figura 2.4 – Ilustração das várias orientações dos dipolos elétricos num determinado material durante as 3 fases da polarização: a) Dipolos elétricos orientados de forma aleatória; b) Dipolos elétricos perfeitamente alinhados durante a aplicação de um campo elétrico externo; c) Dipolos elétricos alinhados com ligeiro desvio quando o campo elétrico externo é retirado (adaptado de [7]).	6
Figura 2.5 – Ilustração do a) efeito piezoelétrico direto – quando uma deformação mecânica é aplicada, a polarização elétrica do material altera-se gerando uma tensão elétrica no material – e b) do efeito piezoelétrico inverso – o material deforma-se quando é sujeito a uma tensão elétrica (adaptado de [9]).	7
Figura 2.6 – Ilustração da estrutura de cristal perovskita: a) Quando a temperatura é superior à temperatura de Curie o íão central encontra-se exatamente ao centro da célula unitária; b) Quando a temperatura é inferior à temperatura de Curie o íão central desloca-se da sua posição inicial e central (adaptado de [25]).	9
.....	10
Figura 2.7 – Representação das 6 direções possíveis tanto das deformações mecânicas como das tensões elétricas, aplicadas e resultantes, nos materiais piezoelétricos bem como a representação da direção típica de polarização nos materiais (adaptado de [27]).	10
Figura 3.1 – Ilustração de um sistema de medição do coeficiente piezoelétrico d_{33} pelo método quase-estático (adaptado de [31]).	11
Figura 3.2 – Esquema e modo de registo de um microscópio de força piezoelétrica: a) Ilustração da configuração e constituição de um microscópio de força piezo com a amostra sobre o substrato, a ponta condutora a tocar na amostra, um laser que reflete na ponta e incide num fotodetetor que por sua vez envia o sinal para a instrumentação e eletrónica associada; b) Deslocamento vertical da ponta condutora consoante quando o campo elétrico e a polarização têm direções verticais e o consequente	

registro no fotodetector; c) Deslocamento horizontal da ponta condutora quando o campo elétrico tem uma direção vertical e a polarização uma direção horizontal, bem como o registro no fotodetector consequente (adaptado de [32]).	12
Figura 3.3 – Em cima é representado a interferência construtiva onde duas ondas com a mesma frequência, a mesma amplitude e em fase originam uma onda com a mesma frequência e o dobro da amplitude; Em baixo é representado a interferência destrutiva onde duas ondas com a mesma frequência, a mesma amplitude, mas desfasadas de 180° entre si originam a anulação completa da onda resultante (adaptado de [37]).	14
Figura 3.4 – Visibilidade das franjas de interferência e a sua dependência em função da diferença de fase entre duas ondas com a mesma frequência (adaptado de [38]).	15
.....	16
Figura 3.5 – Esquema de um interferómetro de Michelson na sua forma mais simples, constituído por uma fonte de luz, um separador de feixe, um espelho móvel, um espelho fixo e um detetor: a) Situação em que existe interferência construtiva devido aos dois feixes se encontrarem em fase; b) Situação em que existe interferência destrutiva devido aos dois feixes se encontrarem desfasados.	16
Figura 3.6 – Padrão de franjas de interferência: a) Franjas com a forma circular devido a um bom alinhamento dos espelhos; b) Franjas paralelas devido a um mau alinhamento dos espelhos [36].	17
Figura 4.1 – Imagem do interferómetro desenvolvido com respetiva legenda.	19
Figura 4.2 – Imagem ampliada da mesa ótica com os respetivos componentes do interferómetro desenvolvido.	20
Figura 4.3 – Esquema do interferómetro desenvolvido (adaptado de [41]).	20
Figura 4.4 – Divisor de feixe ótico idêntico ao utilizado, reflete 50% e transmite 50% do feixe incidente [42].	21
Figura 4.5 – Suporte de espelhos cinemático KM100 da <i>Thorlabs, Inc</i> , utilizado para suporte do porta amostras e do espelho vibrante.	22
Figura 4.6 – Imagem da montagem do suporte de teflon e do suporte de bronze que fixam o cristal piezoelétrico entre eles e ainda o espelho 2 que é fixado ao suporte de bronze.	23
Figura 4.7 – Imagem do transdutor piezoelétrico idêntico ao utilizado para fazer mover o espelho 2 de posição [43].	23
Figura 4.8 – Imagem do fotodetetor e do filtro ótico utilizados e devidamente alinhados.	24
Figura 4.9 – Esquema do circuito interno do fotodetetor bem como a resistência de carga, externa, (55 K) adicional (adaptado de [44]).	25
Figura 4.10 – Esquema do circuito do oscilador implementado (adaptado de [45]).	26

Figura 4.11 – Representação do sinal à saída do oscilador implementado. Trata-se de uma onda quadrada que varia entre +5 V e -5 V (adaptado de [46]).	27
Figura 4.12 – Esquema do integrador amplificador implementado utilizando o amplificador operacional LT 1012 (adaptado de [47]).	28
Figura 4.13 – Representação do sinal obtido após a integração. Trata-se de um sinal triangular, em forma de rampa, com uma amplitude pico a pico de aproximadamente 28,6 V e com um período de 50 s (adaptado de [46]).	29
Figura 4.14 – Dimensões do cristal cerâmico piezoelétrico utilizado para a calibração do sistema implementado.	31
Figura 4.15 – Configuração das direções dos eixos utilizada na amostra de cristal cerâmico piezoelétrico e representação da direção de polarização.	31
Figura 4.16 – Sistema de vácuo implementado no laboratório de plasmas do CEFITEC: a) Imagem do sistema de vácuo utilizado para a deposição de filmes finos de alumínio nas amostras cerâmicas piezoelétricas com a câmara de vácuo em cima e tanto as duas bombas como a instrumentação associada em baixo; b) Esquema do sistema de vácuo utilizado [59].	32
Figura 4.17 – Antes e depois da deposição do filme fino de alumínio numa das faces de uma das amostras cerâmicas piezoelétricas: a) Antes da deposição do filme fino de alumínio; b) Depois da deposição do filme fino de alumínio.	33
Figura 4.18 – Ilustração do sinal de modulação piezoelétrico de um feixe de luz medido no interferómetro desenvolvido através do método de medição automático [61].	36
Figura 4.19 – Imagem do padrão de franjas produzido durante a calibração por dois métodos de medida com uma visibilidade de franjas superior a 0.80 segundo a equação 3.2.	37
Figura 4.20 – Característica linear resultante do efeito piezoelétrico do cerâmico piezoelétrico 1 e resultante da equação 4.7.	38
Figura 4.21 – Característica linear resultante do efeito piezoelétrico do cerâmico piezoelétrico 2 e resultante da equação 4.7.	39
Figura 4.22 – Característica linear resultante do efeito piezoelétrico do cerâmico piezoelétrico 1 e resultante da equação 4.8.	40
Figura 4.23 - Característica linear resultante do efeito piezoelétrico do cerâmico piezoelétrico 2 e resultante da equação 4.8.	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Características do fotodetector DET110 da <i>ThorLabs, Inc.</i> utilizado no interferómetro.	24
Tabela 4.2 – Valores do coeficiente piezoelétrico d_{33} obtidos para os cerâmicos PZT 1 e 2 pelo método manual.	39
Tabela 4.3 – Valores do coeficiente piezoelétrico d_{33} obtidos para os cristais PZT 1 e 2 pelo método automático.	41

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

E	Campo elétrico
E_c	Campo elétrico crítico
d_{ij}	Coefficiente piezoelétrico
λ	Comprimento de onda
$\Delta\phi$	Diferença de fase
Δp	Diferença entre caminhos óticos
f	Frequência
w	Frequência angular
I	Intensidade
T	Período
P	Polarização
P_s	Polarização espontânea
P_R	Polarização remanescente
V_{rms}	Potencial de Modulação
T_c	Temperatura de Curie
t	Tempo
v	Visibilidade
P_b	Chumbo
T_i	Titânio
Z_r	Zircónio

ADN	Ácido desoxirribonucleico
AC	Corrente alternada
PVDF	Fluoreto de polivinilideno
AFM	Microscópio de força atômica
PFM	Microscópio de força piezoelétrica
PZT	Titanato zirconato de chumbo
PSZT	Titanato zirconato de chumbo dopado com estrôncio
PLZT	Titanato zirconato de chumbo dopado com lantânio
PNZT	Titanato zirconato de chumbo dopado com nióbio

1 INTRODUÇÃO

O efeito piezoelétrico consiste na capacidade de um dado material alterar a sua polarização elétrica em resposta a uma deformação mecânica sendo que o inverso também se observa, ou seja, o mesmo material quando submetido a um campo elétrico apresenta deformações mecânicas. Os efeitos direto e inverso estão sempre associados e manifestam-se em cristais, materiais sintéticos, orgânicos e naturais que apresentem falta de simetria na sua estrutura cristalina.

Atualmente o efeito piezoelétrico é utilizado em muitas áreas da indústria e da ciência, desde as aplicações mais básicas às mais complexas, servindo como fontes de alta tensão e de energia, fontes de ignição, sensores e atuadores. Em plena era tecnológica, onde a energia na forma elétrica é fundamental, a escassez de recursos humanos para a sua produção é quase inevitável e a procura por fontes de energia alternativa aumenta, a piezoelectricidade desempenha cada vez mais um papel fulcral na solução para a produção de energia de forma sustentável.

Para que a piezoelectricidade seja utilizada em dispositivos, é importante que as propriedades piezoelétricas de um dado material sejam caracterizadas. É neste contexto que esta dissertação apresenta o desenvolvimento de um sistema para medição do efeito piezoelétrico inverso baseado numa técnica interferométrica de medição da diferença de fase entre dois ramos de um interferómetro de Michelson.

O presente trabalho encontra-se organizado da seguinte forma: no capítulo 2 é feita uma introdução ao efeito piezoelétrico; no capítulo 3 são apresentadas as técnicas mais comuns de medição do efeito piezoelétrico onde é feita uma descrição do funcionamento de cada uma; o capítulo 4 é dedicado à implementação do sistema onde se explica a escolha da técnica utilizada, os materiais necessários para a construção do interferómetro assim como toda a eletrónica associada, sendo ainda apresentados os resultados da otimização e da calibração do interferómetro através de dois métodos distintos e o procedimento experimental inerente; no capítulo 5 são expostas as conclusões do trabalho realizado e algumas perspetivas futuras.

2 EFEITO PIEZOELÉTRICO

Neste capítulo serão apresentados sucintamente os conceitos básicos e teóricos bem como as equações que os descrevem e que permitem compreender de uma forma, objetiva e pertinente, o efeito piezoelétrico relevante para a realização deste trabalho.

2.1 ESTRUTURA CRISTALINA E CLASSES DOS MATERIAIS

Das 32 classes de simetria de estruturas cristalinas, segundo eixos rotacionais e planos de reflexão, 21 são não centro-simétricas (não apresentam nenhum eixo de simetria). Destas 21 classes, 20 delas apresentam piezoelectricidade contendo 10 grupos piroelétricos que apresentam um único eixo polar onde a polarização espontânea varia com a temperatura. A figura 2.1 apresenta a forma como estas classes se encontram organizadas e classificadas quanto às propriedades eletroativas e estruturas cristalinas dos materiais[1].

Piroelétricos são todos aqueles materiais capazes de gerarem, temporariamente, um potencial elétrico quando são aquecidos ou arrefecidos. Isto acontece porque a mudança de temperatura destes materiais modifica ligeiramente as posições dos átomos na sua estrutura cristalina, de tal modo que a polarização do material é alterada originando um potencial elétrico. Se a polarização espontânea for reversível através da aplicação de um campo elétrico externo, então o material piroelétrico é ferroelétrico.

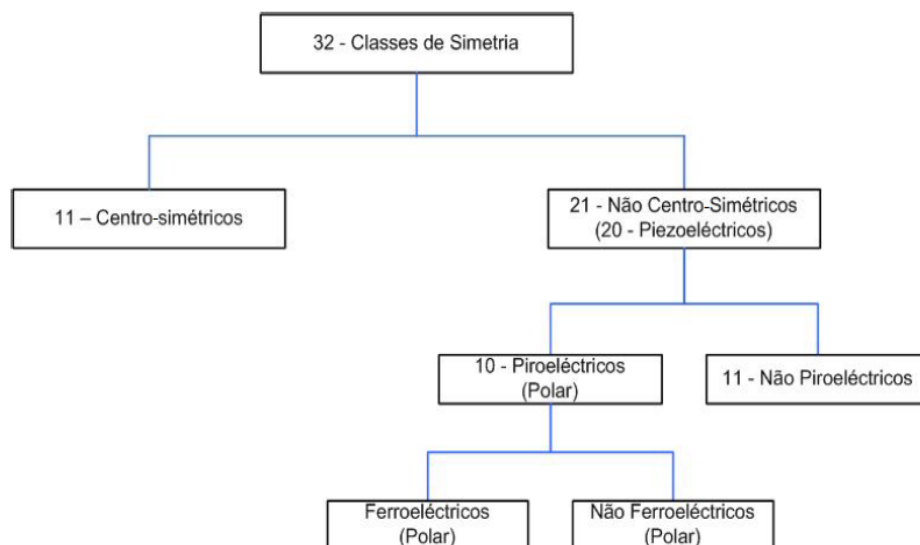


Figura 2.1 – Organização das propriedades eletroativas em relação às estruturas cristalinas e químicas dos materiais (adaptado de [2]).

2.2 FERROELETRICIDADE

Como referido na secção 2.1, a grande característica dos materiais ferroelétricos é a capacidade de reverter a polarização espontânea (P_s) através da aplicação de um campo elétrico externo de intensidade adequada. A polarização espontânea pode ser definida como o momento dipolar elétrico médio por unidade de volume do meio. O campo elétrico crítico necessário para reverter a polarização nos materiais ferroelétricos designa-se de campo coercivo (E_c). A magnitude do campo coercivo depende da temperatura, da frequência e amplitude do campo externo aplicado. A característica polarização instantânea – campo elétrico externo (P - E), apresenta histerese. Um exemplo da característica do ciclo de histerese encontra-se representado na figura 2.2.

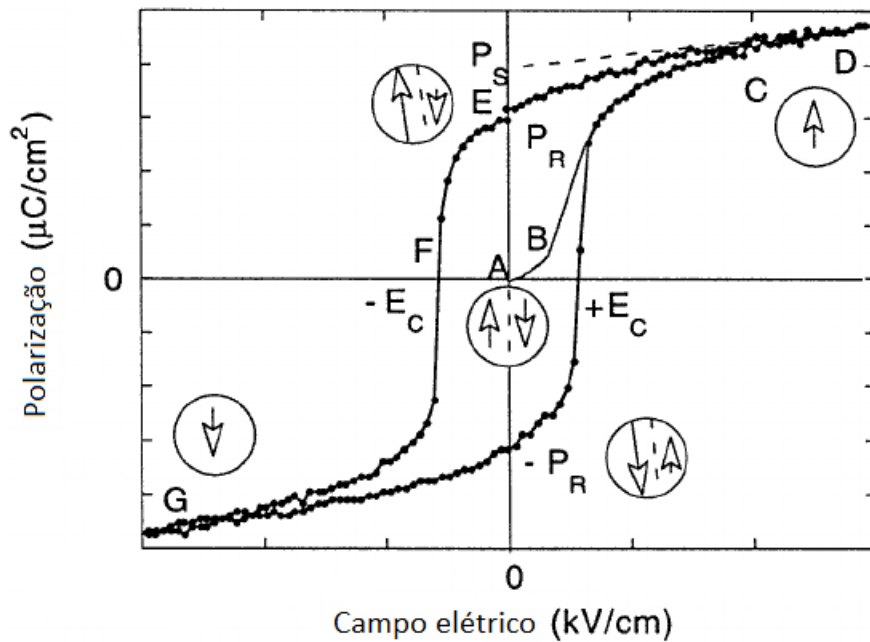


Figura 2.2 – Ciclo de histerese polarização–campo elétrico (P - E). Inicialmente o material encontra-se na situação associada ao ponto A onde não está polarizado nem é sujeito a nenhum campo elétrico. À medida que o campo elétrico é aplicado de certa forma, a polarização induzida manifesta-se e o material descreve um ciclo representado pela sequência A-B-C-D-E-F-G (adaptado de [3]).

Polarização remanescente (P_R) é o valor da polarização sem aplicação de campo. Quando ambos os campos coercivos, positivos e negativos, e as polarizações remanescentes de ambos os estados remanescentes são iguais entre eles, o ciclo de histerese é idealmente simétrico. Na realidade, as curvas são maioritariamente assimétricas devido a vários fatores como elétrodos dissimilares e deformações mecânicas não homogêneas. Além do ciclo de histerese polarização-campo elétrico, a

inversão da polarização induzida por um campo elétrico nos materiais ferroelétricos origina uma histerese deformação-campo elétrico que se assemelha aos contornos de uma borboleta [4]. Na figura 2.3 está representado uma histerese deformação-campo elétrico ideal.

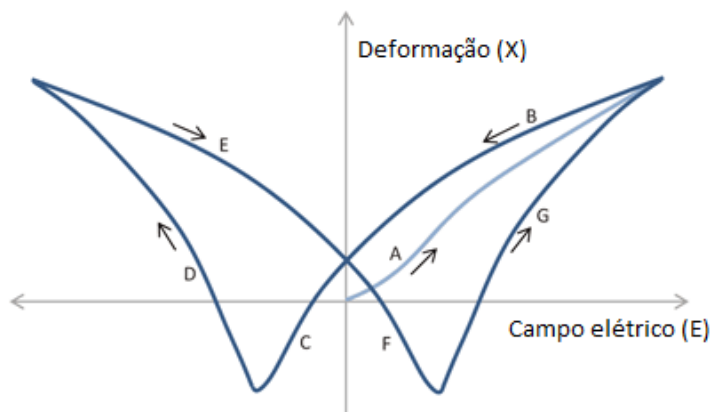


Figura 2.3 – Ciclo de histerese deformação - campo elétrico. De um modo ideal, à medida que um material é sujeito a um campo elétrico, deforma-se originando uma histerese que se assemelha aos contornos de uma borboleta seguindo a sequência A-B-C-D-E-F-G (adaptado de[5]).

2.3 POLARIZAÇÃO

Numa estrutura cristalina polar que compreende várias células unitárias os dipolos estão, por norma, orientados de forma aleatória. Quando o material é submetido a uma tensão mecânica, cada dipolo irá alterar a sua orientação inicial até uma orientação final que minimizará a energia elétrica e mecânica armazenada no dipolo. Se, inicialmente, todos os dipolos se encontrarem orientados aleatoriamente, como ilustrado na figura 2.4 - a), a sua rotação pode não alterar significativamente a polarização macroscópica do material, pelo que o efeito piezoelétrico exibido será insignificante. Portanto, é importante que se crie um estado inicial onde todos os dipolos (ou pelo menos a grande maioria) se encontrem orientados na mesma direção e isto consegue-se através da aplicação de um campo elétrico externo intenso durante um determinado período. Durante a aplicação do campo elétrico, os dipolos irão orientar-se todos na mesma direção, figura 2.4 - b), e quando o campo elétrico for retirado a maioria dos dipolos permanecerão, não retornando às suas orientações iniciais, semelhante à ilustração na figura 2.4 - c). Esta polarização é reversível através de um campo elétrico externo aplicado na direção contrária[6].

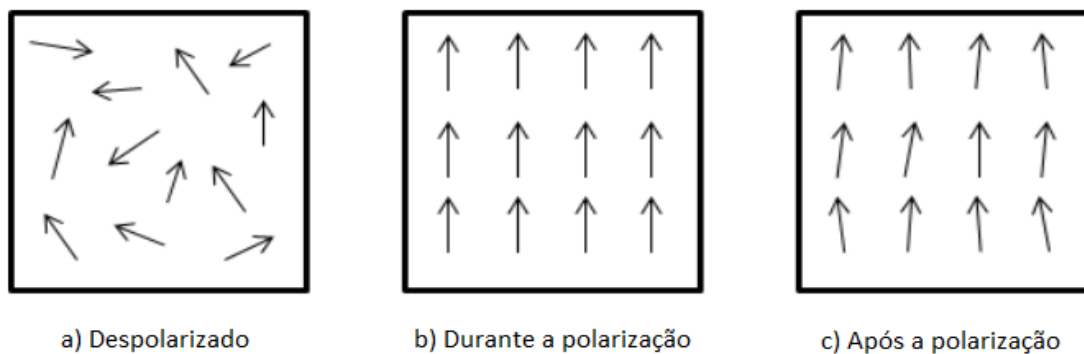


Figura 2.4 – Ilustração das várias orientações dos dipolos elétricos num determinado material durante as 3 fases da polarização: a) Dipolos elétricos orientados de forma aleatória; b) Dipolos elétricos perfeitamente alinhados durante a aplicação de um campo elétrico externo; c) Dipolos elétricos alinhados com ligeiro desvio quando o campo elétrico externo é retirado (adaptado de [7]).

2.4 PIEZOELETRICIDADE

Em 1880 Jacques e Pierre Curie descobriram que a pressão gerava cargas elétricas em cristais como o quartzo e a turmalina. Este efeito foi denominado como efeito piezoelétrico ou piezoeletricidade para distinguir de outros efeitos na mesma área, tal como a eletricidade por contacto que gera a eletricidade estática e também a piroeletricidade que dá nome à eletricidade gerada através do aquecimento de cristais. A palavra piezo deriva da palavra grega para pressão. Um ano depois da descoberta da piezoeletricidade, 1881, Lippman deduziu matematicamente, através de princípios termodinâmicos fundamentais, que o efeito piezoelétrico era possível de forma inversa e meses depois os irmãos Curie provaram-no[8].

Definiu-se então que o efeito piezoelétrico direto consiste na capacidade de um dado material alterar a sua polarização elétrica em resposta a deformação mecânica e o efeito piezoelétrico inverso está associado ao mecanismo contrário, ou seja, o material apresenta deformações mecânicas quando é submetido a um campo elétrico. Na figura 2.5 encontra-se esquematizado os dois efeitos piezoelétricos, o direto à esquerda e o inverso à direita.

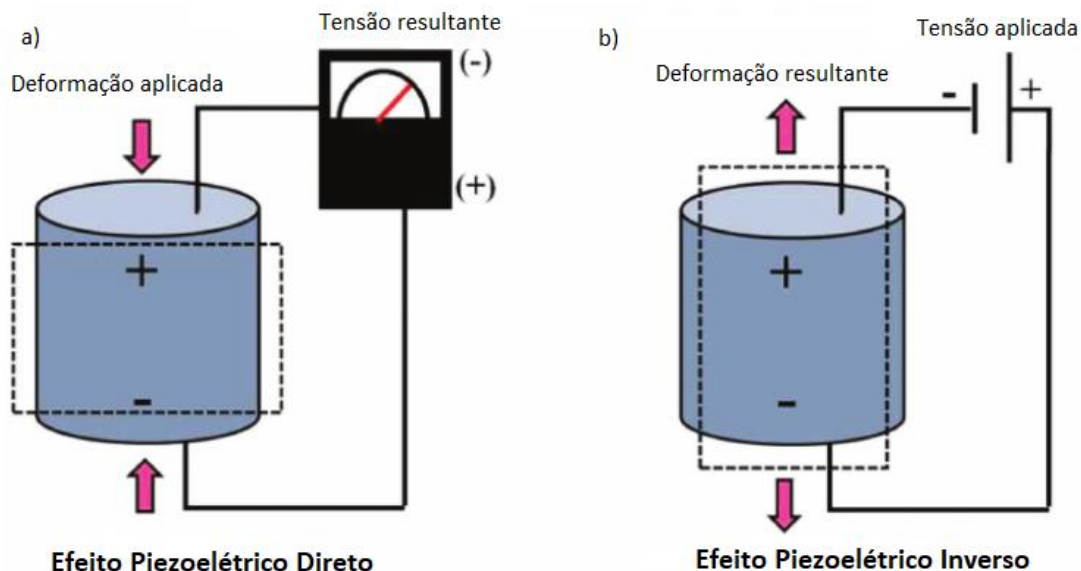


Figura 2.5 – Ilustração do a) efeito piezoelétrico direto – quando uma deformação mecânica é aplicada, a polarização elétrica do material altera-se gerando uma tensão elétrica no material – e b) efeito piezoelétrico inverso – o material deforma-se quando é sujeito a uma tensão elétrica (adaptado de [9]).

A piezoeletricidade existe naturalmente em diversos cristais tais como quartzo, topázio, sacarose, tartarato de sódio e potássio mais conhecido por sal de *La Rochelle* e ainda em materiais orgânicos e naturais como o osso, ADN (ácido desoxirribonucleico), tendões, seda, dentes e madeira. Pode-se manifestar também em materiais sintéticos como, por exemplo, cerâmicas, semicondutores e polímeros.

Até pouco depois de 1920 o efeito piezoelétrico era apenas uma curiosidade. A mudança deu-se quando a sua presença no quartzo foi utilizada para a estabilização de osciladores de cristal dando início ao campo de controlo de frequência de ressonância[10]. Com esta introdução a cronometragem passou do sol e das estrelas para fontes pequenas criadas pelo homem que superaram as referências baseadas na astronomia quanto à estabilidade. Desde então que as aplicações do efeito piezoelétrico em dispositivos não parou de crescer, tendo sido criados equipamentos como sonares[11], hidrofonos[12], microfones[13], acelerómetros[14] e transdutores ultrassónicos[15]. A descoberta do efeito piezoelétrico no polímero de fluoreto de polivinilideno (PVDF) por Kawai em 1969 [16] deu origem a um grande número de aplicações fazendo uso das propriedades intrínsecas deste polímero, como a flexibilidade mecânica. Atualmente, as aplicações da piezoeletricidade incluem materiais inteligentes

para controle de vibração[17], aplicações aeroespaciais e astronáuticas de superfícies e estruturas flexíveis[18], sensores de aplicações robóticas[19], novas aplicações para a redução de vibração em equipamentos desportivos como raquetes de ténis, pranchas de snowboard e tacos de baseball[20] ou a produção de energia através de roupas e calçados próprios, com materiais piezoelétricos, capazes de gerar e armazenar energia durante uma caminhada ou um dia de trabalho[21].

A piezoelectricidade pode ser explicada através da assimetria da estrutura cristalina dos materiais. Devido a um ou mais átomos/iões de uma determinada célula unitária, numa estrutura cristalina não centro-simétrica, não estarem centrados ou alinhados com um eixo de simetria, desenvolve-se uma polarização elétrica tornando a célula unitária num dipolo elétrico. Quando é exercida uma tensão mecânica no cristal, dá-se uma alteração da posição destes átomos variando a intensidade da polarização do material dando origem a uma força eletromotriz induzida (efeito piezoelétrico direto). Por outro lado, quando o cristal é submetido a um campo elétrico os mesmos átomos/iões irão alterar a sua posição, resultando numa distorção da célula unitária e originando uma deformação mecânica (efeito piezoelétrico indireto)[22].

Perovskita é o nome dado ao mineral titanato de cálcio (CaTiO_3) em homenagem ao mineralogista russo C.L.A. von Perovskite depois de ter sido descoberta em 1830 pelo geólogo G. Rose [23]. Desde então, o nome perovskita é usado para nomear uma classe de materiais que têm uma fórmula química do tipo ABC_3 onde A é o catião de maiores dimensões e mais iónico, B é, geralmente, um metal de transição e C é sempre o oxigénio. A ferrita de bismuto (BiFeO_3) ou o titanato zirconato de chumbo ($\text{Pb}[\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}]\text{O}_3$ com $0 < x < 1$) são exemplos de materiais com estruturas perovskitas. As combinações entre os iões A e B são variadas e dão origem à distorção da estrutura cúbica teórica do óxido, levando a compostos cúbicos, tetragonais, ortorrômnicos, romboédricos e monoclínicos, na maioria das vezes, auxiliando a propriedade final do óxido [24].

Analisando a figura 2.6 que ilustra uma estrutura perovskita, é possível verificar que o efeito piezoelétrico tem a sua origem no ião central da célula unitária. Um conjunto de cristais com estrutura *perovskita* formam uma cerâmica piezoelétrica. Quando a temperatura atinge valores acima da temperatura de Curie, figura 2.6 - a), a célula unitária apresenta uma estrutura cúbica perfeita com um arranjo simétrico entre cargas positivas e negativas. Contudo, quando a temperatura desce e se torna inferior a T_C , figura 2.6 - b), o ião central desloca-se ligeiramente fazendo com que a estrutura cristalina altere para ortorrômbrica não havendo mais um arranjo simétrico entre cargas positivas e negativas originando uma polarização elétrica e consequentemente a célula unitária comportar-se-á como um dipolo elétrico possibilitando o aparecimento do efeito piezoelétrico.

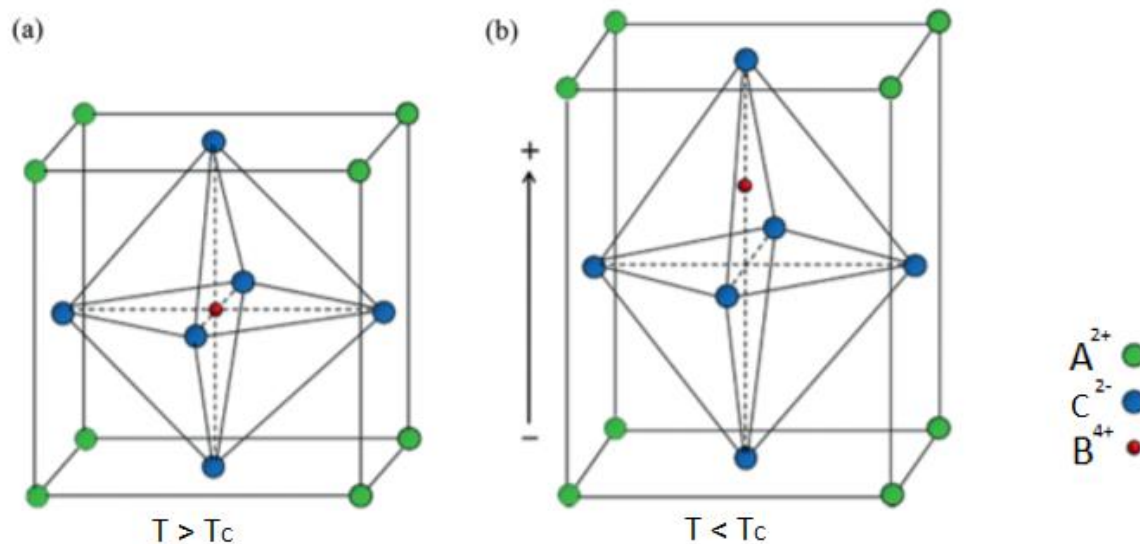


Figura 2.6 – Ilustração da estrutura de cristal perovskita: a) Quando a temperatura é superior à temperatura de Curie o íon central encontra-se exatamente ao centro da célula unitária; b) Quando a temperatura é inferior à temperatura de Curie o íon central desloca-se da sua posição inicial e central (adaptado de [25]).

2.5 COEFICIENTE PIEZOELÉTRICO

Em ambos os efeitos piezoelétricos, direto e inverso, há uma relação linear entre a deformação mecânica e a polarização elétrica. A relação matemática na forma tensorial do efeito direto e do efeito inverso, respetivamente, pode ser expressa da seguinte forma[26]:

$$D_i = d_{ij} T_j \quad (2.1)$$

$$S_j = d_{ij} E_i \quad (2.2)$$

onde d_{ij} é o coeficiente piezoelétrico com as unidades de m/V (ou C/N), T_j é a tensão mecânica aplicada, D_i é o campo elétrico induzido, E_i é o campo elétrico aplicado e S_j é a deformação mecânica induzida. A magnitude de d_{ij} é afetada por diversos fatores como por exemplo os níveis de cristalinidade e de orientação (textura) do material [26].

Os índices ij são importantes para representarem as direções em que as forças mecânicas e os campos elétricos são aplicados ou originados. O primeiro índice, i , representa a direção da tensão mecânica aplicada (ou a direção do campo elétrico aplicado) e o segundo índice, j , a direção do campo

elétrico resultante (ou a direção da deformação mecânica resultante), respetivamente. Por norma, a direção de polarização positiva é feita coincidir com o eixo dos Z de um sistema cartesiano de coordenadas X, Y e Z. Assim sendo, as direções X, Y ou Z são representadas pelos índices 1, 2 ou 3, respetivamente, e as rotações sobre esses mesmos eixos são representados pelos índices 4, 5 e 6 como se encontra ilustrado na figura 2.7[22].

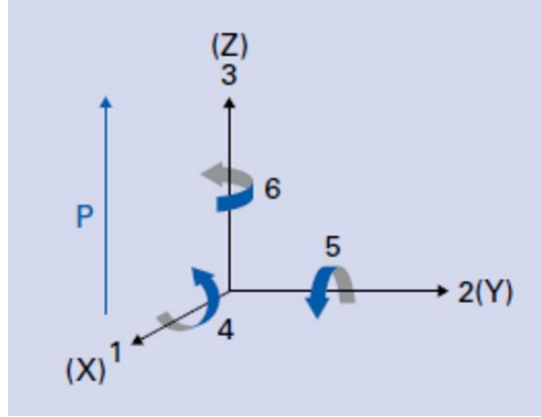


Figura 2.7 – Representação das 6 direções possíveis tanto das deformações mecânicas como das tensões elétricas, aplicadas e resultantes, nos materiais piezoelétricos bem como a representação da direção típica de polarização nos materiais (adaptado de [27]).

Assumindo que a direção de polarização é paralela à direção 3 (assunção mais comum), na forma matricial, os coeficientes piezoelétricos diferentes de zero são representados para o efeito direto e para o efeito inverso, respetivamente, da seguinte forma [22]:

$$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{32} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{24} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

onde $d_{31} = d_{32}$ e $d_{15} = d_{24}$ no caso de cerâmicas piezoelétricas [28].

3 MEDIÇÃO DO COEFICIENTE PIEZOELÉTRICO

Neste capítulo são apresentados os métodos de medida mais comuns utilizados para a medição do efeito piezoelétrico direto, assim como o efeito piezoelétrico inverso.

3.1 MÉTODO QUASE-ESTÁTICO

Mais conhecido por método de Berlincourt, é o método mais simples utilizado para a medição do coeficiente piezoelétrico d_{33} através do efeito piezoelétrico direto. Este sistema de medição foi apresentado em 1971, pelos irmãos Jaffe e por Cook Jr. no “*Piezoelectric Ceramics*”, tendo ficado conhecido como método de Berlincourt. Don Berlincourt trabalhava na *Channel Products* durante o desenvolvimento e comercialização de um dos primeiros sistemas de medição do coeficiente piezoelétrico d_{33} [29].

Neste método, quando uma força é exercida de forma uniforme na amostra piezoelétrica esta deforma-se induzindo uma diferença de potencial que é medida através de dois elétrodos que estão colocados nas duas faces da amostra [30]. Um esquema deste sistema encontra-se representado na figura 3.1.

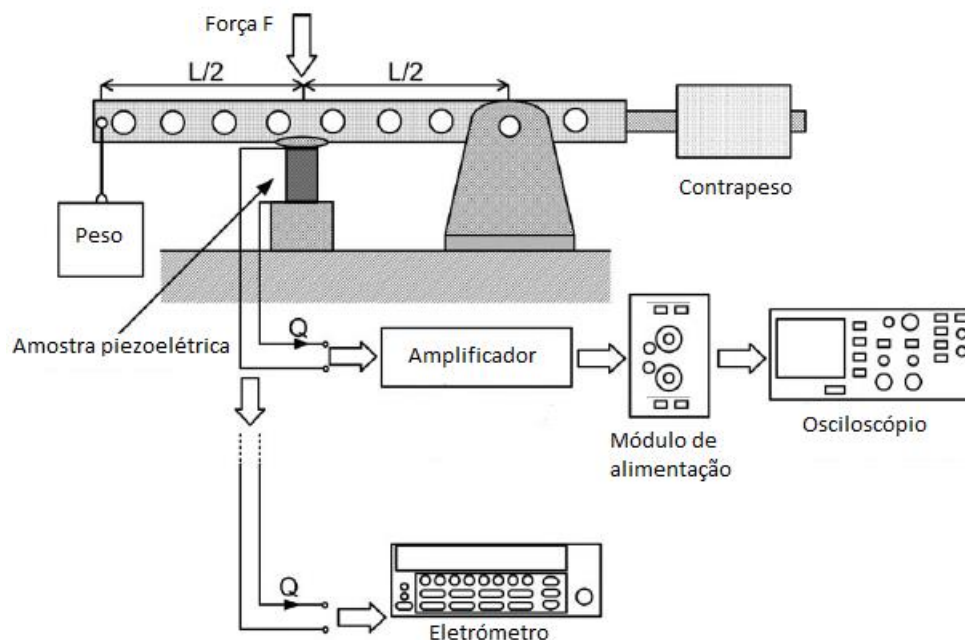


Figura 3.1 – Ilustração de um sistema de medição do coeficiente piezoelétrico d_{33} pelo método quase-estático (adaptado de [31]).

Como a frequência de excitação da amostra é muito baixa, este método é classificado de quase-estático. Tem a mais valia de ser simples, rápido e barato. Sistemas mais complexos permitem variar a frequência ou a amplitude da tensão mecânica aplicada para medições mais confiáveis, contudo, continua a ser muito difícil a homogeneidade da força aplicada. A principal limitação, além de só medir o efeito piezoelétrico direto, reside em apenas ser possível medir os coeficientes d_{33} e d_{31} visto que, para caracterizar as propriedades piezoelétricas de um material de forma completa, são necessários pelo menos 3 coeficientes por forma a abranger todas as possíveis direções de deformação desse mesmo material. [30].

3.2 MICROSCOPIA DE FORÇA PIEZOELÉTRICA

Em 1992, Guethner e Dransfeld implementaram pela primeira vez o Microscópio de Força Piezoelétrica, PFM, na medição das micro regiões polarizadas de um determinado material ferroelétrico na forma de filme fino. É uma variação do Microscópio de Forças Atômicas, AFM, que também utiliza o efeito piezoelétrico, onde a ponteira trabalha em modo de contato graças a um sistema de realimentação que mantém a força entre a microhaste e a amostra constante. Um esquema deste microscópio encontra-se na figura 3.2.

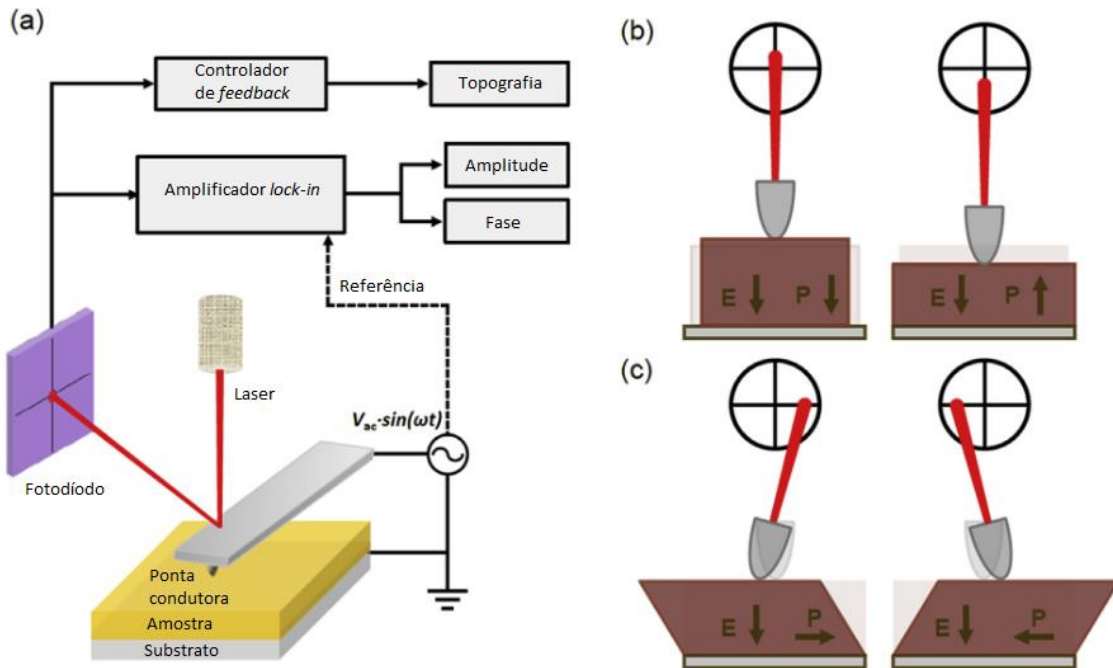


Figura 3.2 – Esquema e modo de registo de um microscópio de força piezoelétrica: a) Ilustração da configuração e constituição de um microscópio de força piezo com a amostra sobre o substrato, a ponta condutora a tocar na amostra, um laser que reflete na ponta e incide num fotodetector que por sua vez envia o sinal para a instrumentação e eletrónica associada; b) Deslocamento vertical da ponta condutora consoante quando o campo elétrico e a polarização têm direções verticais e o consequente registo no fotodetector; c) Deslocamento horizontal da ponta condutora quando o campo elétrico tem uma direção vertical e a polarização uma direção horizontal, bem como o registo no fotodetector consequente (adaptado de [32]).

Neste aparelho, é aplicado um sinal elétrico alternado AC que é conduzido pela ponta de prova e atravessa a amostra piezoelétrica até chegar ao eléctrodo inferior que está ligado à terra, originando a deformação da amostra, efeito piezoelétrico inverso, e transmitindo as variações mecânicas à ponta de prova que são posteriormente detetadas pelo fotodetector [33][34][35].

Por norma, é utilizado um amplificador *lock-in* que produz um sinal de referência com uma amplitude e uma frequência conhecida. A frequência obtida à saída do *lock-in* é considerada proporcional à resposta piezoelétrica e à polarização da amostra a ser medida. Desta forma, o sinal obtido pela ponta de prova é modulado e contém duas frequências. Subtraindo o sinal de referência ao sinal medido pela ponta de prova, obtêm-se o sinal relativo ao efeito piezoelétrico. Sabendo que regiões com diferentes polarizações dão origem a diferentes fases, um *software* cria um mapa de cores - a partir do sinal do *lock-in* - no qual as regiões com diferentes polarizações contrastam, dando origem a uma imagem topográfica da amostra, semelhante ao sucedido no AFM. De realçar que as medidas no PFM no plano são realizadas de forma diferente do AFM. Enquanto as medidas de força lateral no AFM exigem que a ponta de prova se desloque lateralmente, as medidas no plano em PFM são realizadas através das deformações da amostra, geradas pelo efeito piezoelétrico inverso, que torcem a ponta de prova e dão uma resposta lateral no fotodetector. As amplitudes das oscilações fora do plano estão relacionadas com o coeficiente piezoelétrico d_{33} da amostra, e a fase está relacionada com a orientação da polarização, enquanto as oscilações piezoelétricas dentro do plano são proporcionais ao coeficiente d_{31} . E, finalmente, o cálculo do coeficiente piezoelétrico pode ser determinado diretamente a partir do deslocamento da amostra em função da tensão aplicada [33][34][35].

A grande vantagem deste método prende-se especialmente pela alta resolução dentro da escala nanométrica. Contudo, as medições através deste método podem nem sempre ser fiáveis. Isto deve-se a um conjunto de efeitos não-piezoelétricos que podem aparecer na amostra e afetarem os resultados obtidos. Efeitos como a tensão eletroquímica, eletrostricção, flexoelectricidade e o efeito de Joule, podem ser responsáveis por medidas de coeficientes piezoelétricos deficientes [32].

3.3 INTERFEROMETRIA ÓTICA

Nos últimos anos tem sido cada vez mais comum o uso de sistemas interferométricos para determinação do efeito piezoelétrico. Isto deve-se ao facto de duas ondas com a mesma frequência, quando se sobrepõem num dado ponto, formarem uma nova onda cuja amplitude é o resultado da soma da amplitude das duas ondas iniciais em cada instante nesse ponto. Esta soma tanto pode ser positiva, resultando numa amplitude superior comparativamente com as amplitudes das duas ondas iniciais

denominando-se de interferência construtiva, como pode resultar numa amplitude inferior denominando-se de interferência destrutiva. A onda resultante pode ser descrita pela seguinte equação [36]:

$$E_T = E_1 e^{i(\phi_1 - \omega t)} + E_2 e^{i(\phi_2 - \omega t)} \quad (3.1)$$

admitindo-se que $E_1 e^{i(\phi_1 - \omega t)}$ pode representar uma das ondas num dos ramos dum interferómetro e $E_2 e^{i(\phi_2 - \omega t)}$ pode representar a onda no outro ramo do interferómetro, sendo E_1 e E_2 as amplitudes dos respetivos campos elétricos, ϕ_1 e ϕ_2 as respetivas fases iniciais, ω a frequência angular e t o tempo. Se $\phi_1 - \phi_2 = 2N\pi$ (com $N = 0, 1, 2, \dots$) as duas ondas estão em fase entre si originando uma interferência construtiva e uma amplitude da onda resultante superior enquanto, se $\phi_1 - \phi_2 = (2N+1)\pi$ (com $N = 0, 1, 2, \dots$) as duas ondas estão em oposição de fase originando uma interferência destrutiva e uma amplitude da onda resultante inferior [36]. As duas situações descritas anteriormente encontram-se representadas na figura 3.3.

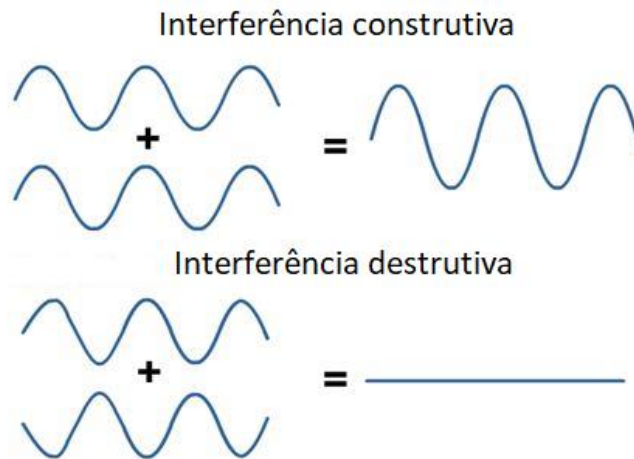


Figura 3.3 – Em cima é representado a interferência construtiva onde duas ondas com a mesma frequência, a mesma amplitude e em fase originam uma onda com a mesma frequência e o dobro da amplitude; Em baixo é representado a interferência destrutiva onde duas ondas com a mesma frequência, a mesma amplitude, mas desfasadas de 180° entre si originam a anulação completa da onda resultante (adaptado de [37]).

A visibilidade da franja de interferência (v), também intitulada de visibilidade de *Michelson*, possibilita o cálculo experimental da coerência que traduz a correlação entre as duas ondas, ou seja, mede o quão constante permanece a diferença de fase entre as duas ondas. A coerência entre duas ondas é tanto maior quanto mais construtiva for a interferência, e tanto menor quanto mais destrutiva

a interferência. Assim, v , pode ser obtido, de uma forma experimental, através da seguinte expressão[36]:

$$v = \frac{I_{máx} - I_{mín}}{I_{máx} + I_{mín}} \quad (3.2)$$

onde $0 \leq v \leq 1$. Se v for igual a 1 (valor máximo) está-se perante uma coerência total onde o contraste entre as franjas é máximo, e se v for igual a 0 (valor mínimo) trata-se uma coerência nula ou uma incoerência total onde resultando na ausência de franjas. Todos os valores intermédios (entre 0 e 1) denominam-se de coerência parcial [36]. Na figura 3.4 está representada visibilidade das franjas de interferência e a sua dependência em função da diferença de fase entre duas ondas com a mesma frequência.

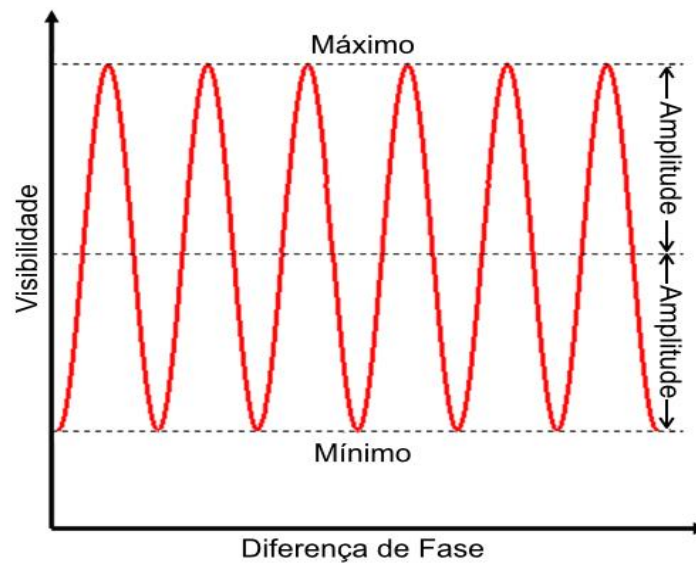


Figura 3.4 – Visibilidade das franjas de interferência e a sua dependência em função da diferença de fase entre duas ondas com a mesma frequência (adaptado de [38]).

O interferómetro de Michelson foi introduzido por Albert Michelson em 1881 e um esquema deste interferómetro encontra-se ilustrado na figura 3.5. Geralmente, na sua forma mais básica, é constituído por uma fonte de luz, um divisor de feixe, dois espelhos (um fixo e um móvel) e um detetor.

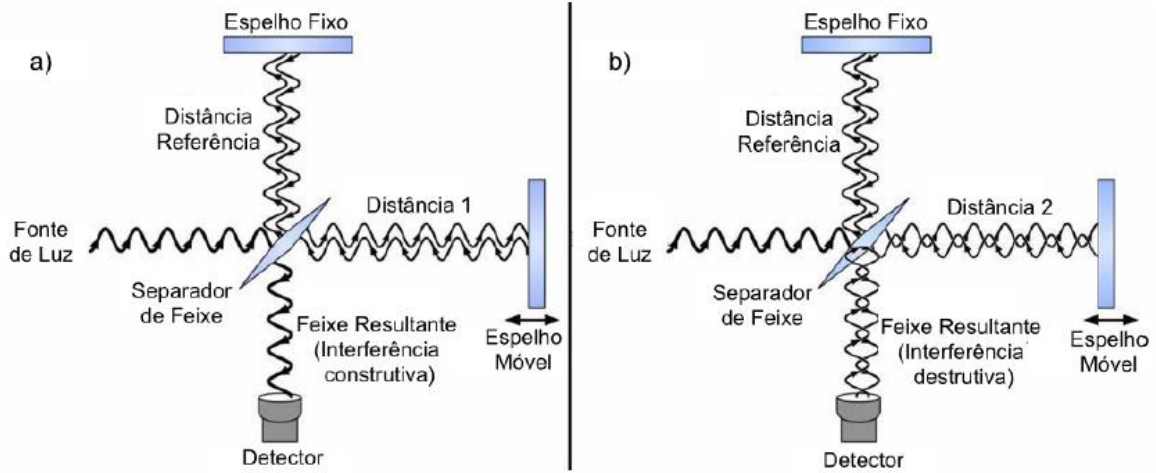


Figura 3.5 – Esquema de um interferômetro de Michelson na sua forma mais simples, constituído por uma fonte de luz, um separador de feixe, um espelho móvel, um espelho fixo e um detector: a) Situação em que existe interferência construtiva devido aos dois feixes se encontrarem em fase; b) Situação em que existe interferência destrutiva devido aos dois feixes se encontrarem desfasados.

Um feixe de luz coerente, incide num divisor de feixe que pode ser um espelho semitransparente, uma fina superfície metálica semitransparente ou ainda um filme dielétrico depositado sobre a superfície de um vidro. Quando o feixe incide no divisor de feixe, como o próprio nome indica, é dividido em dois feixes de intensidades aproximadamente iguais que percorrerão dois ramos do interferómetro distintos até serem refletidos por um espelho. Um dos ramos tem um espelho fixo enquanto o outro tem um espelho móvel. Estes espelhos apresentam-se posicionados perpendicularmente um em relação ao outro. Como ambos os feixes percorrem caminhos óticos diferentes, quando estes se recombinaem num único feixe no divisor de feixe dar-se-á um padrão de interferência que pode ser construtivo ou destrutivo dependendo da diferença de fase que os feixes apresentarem entre eles. Por fim, o feixe resultante é feito incidir num fotodetector para ser medido [36].

A intensidade do sinal ótico (I) medido no fotodetector é possível de se obter através da equação 3.1 e, de uma forma aproximada, escreve-se de seguinte modo [36]:

$$I \approx E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2\cos(\Delta\phi) \quad (3.3)$$

onde E_1 e E_2 representam as amplitudes dos campos elétricos em cada ramo do interferómetro e $\Delta\phi$ a diferença de fase.

Interferência construtiva será obtida quando ambos os espelhos se encontrarem a distâncias iguais do separador de feixe, ou seja, quando a diferença entre caminhos óticos (Δp) for nula, igual a λ ou um múltiplo inteiro de λ . Neste caso o feixe resultante terá uma intensidade correspondente à soma das intensidades de ambos os feixes. A interferência destrutiva dar-se-á quando a diferença de caminhos óticos for igual a $\lambda/2$ ou um múltiplo inteiro de $\lambda/2$ porque é quando os feixes estão desfasados de π resultando numa anulação total do feixe.

A característica do padrão de interferência depende da fonte de luz, mas principalmente da orientação dos espelhos e do espelho semitransparente. Como se pode ver na figura 3.6, se os espelhos estiverem alinhados precisamente na perpendicular as franjas serão circulares (figura 3.6: a)), mas basta um ligeiro desvio na orientação de um dos espelhos para as franjas assumirem uma forma planar (figura 3.6: b)).

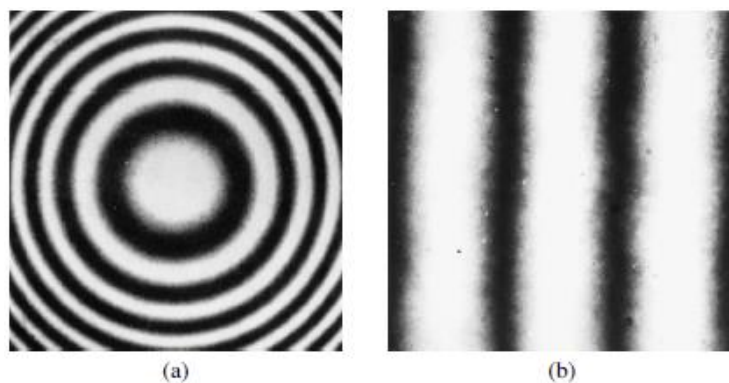


Figura 3.6 – Padrão de franjas de interferência: a) Franjas com a forma circular devido a um bom alinhamento dos espelhos; b) Franjas paralelas devido a um mau alinhamento dos espelhos [36].

As franjas brilhantes correspondem a uma interferência construtiva (máximo) e as franjas escuras correspondem a uma interferência destrutiva (mínimo). Movendo-se um dos espelhos do interferómetro uma distância d , o caminho ótico percorrido por um dos feixes de luz é alterado e observa-se o deslocamento das franjas de interferência. O padrão original é restaurado sempre que [36]:

$$d = \frac{m\lambda}{2} \quad (3.4)$$

sendo λ o comprimento de onda do feixe e $m = 1, 2, 3, \dots$ é determinado contando-se o número de vezes que o padrão de franjas é restaurado.

Como as duas ondas que chegam ao fotodetector são originárias da mesma fonte e, por isso inicialmente têm a mesma fase, a diferença de fase relaciona-se com a diferença entre caminhos óticos de seguinte modo [36]:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta p \quad (3.5)$$

4 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE COEFICIENTE PIEZOELÉTRICO

Este capítulo descreve o sistema implementado para a medição do coeficiente piezoelétrico utilizando o interferômetro de Michelson assim como a sua execução experimental durante a calibração do mesmo através da medição do coeficiente d_{33} do cristal cerâmico PZT comercial.

4.1 INTERFERÔMETRO DESENVOLVIDO

A interferometria ótica foi a técnica escolhida por oferecer, nas medições de coeficientes piezoelétricos, um maior rigor nos resultados obtidos em comparação com as outras técnicas [39][40]. De entre vários interferômetros, o interferômetro de Michelson foi eleito por apresentar uma disposição dos espelhos em cruz permitindo um melhor alinhamento do sistema e por se basear na reflexão do laser permitindo a medição do efeito piezoelétrico em amostras não transparentes ao contrário de outros interferômetros que exigem que o laser atravesse a amostra.

O interferômetro desenvolvido encontra-se na figura 4.1, uma ampliação dos componentes óticos montados na mesa ótica encontra-se na figura 4.2 e uma esquematização do interferômetro desenvolvido na íntegra na figura 4.3:

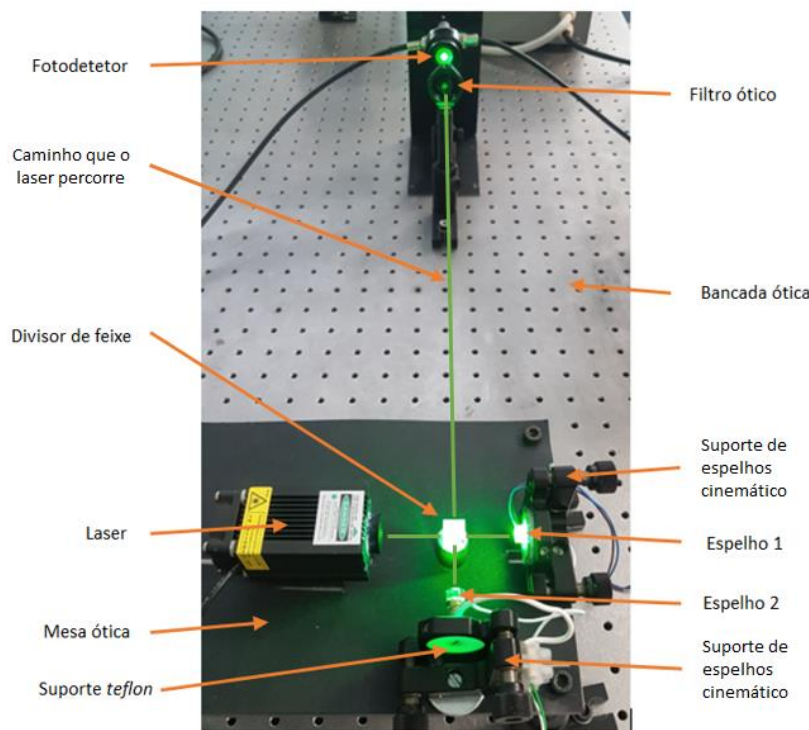


Figura 4.1 – Imagem do interferômetro desenvolvido com respectiva legenda.

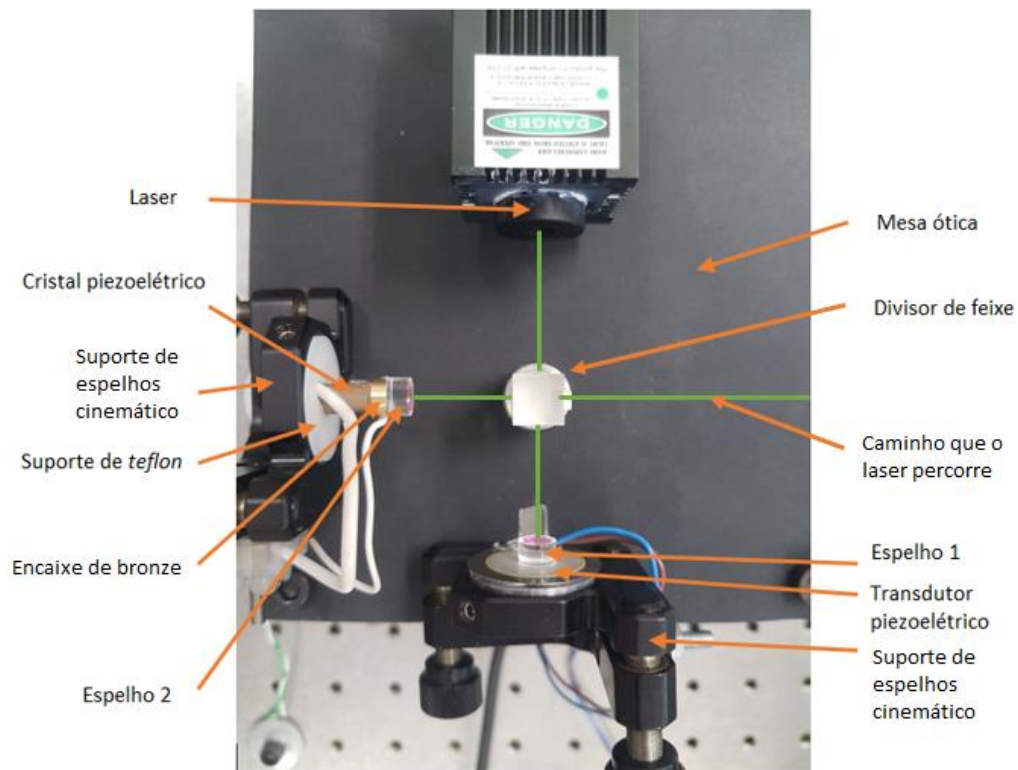


Figura 4.2 – Imagem ampliada da mesa ótica com os respetivos componentes do interferómetro desenvolvido.

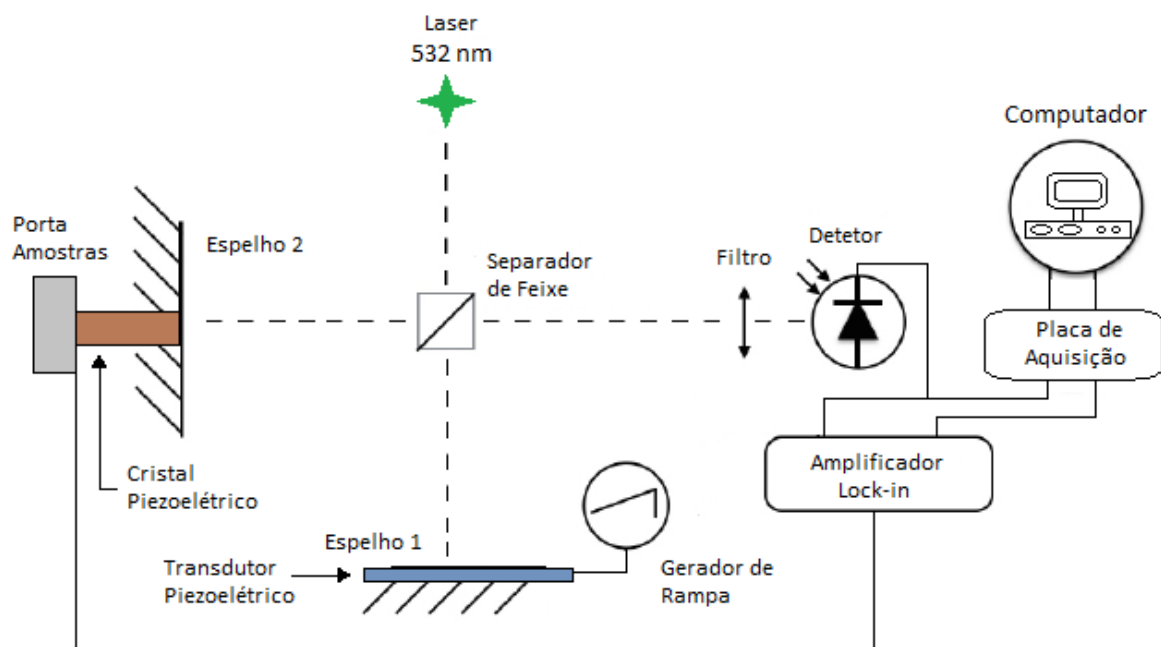


Figura 4.3 – Esquema do interferómetro desenvolvido (adaptado de [41]).

Todo o sistema, à exceção do detetor e da eletrónica associada, assenta numa mesa de ferro construída especialmente com as dimensões $22 \times 15 \times 0,7 \text{ cm}^3$. A mesa é pintada de preto mate para evitar todo o tipo de reflexões. O Ferro, foi o material escolhido por apresentar rigidez adequada e resistência a todo o tipo de vibrações e o tamanho é suficiente para que todos os componentes do sistema possam estar fixos à mesa, de modo a tornar o sistema mais coeso. Por sua vez, a mesa de ferro está fixa numa bancada ótica própria para o efeito que reduz significativamente a sensibilidade do interferómetro a vibrações mecânicas e flutuações térmicas. Assim, garante-se que as interferências exteriores e indesejadas (vibrações, tremores, flutuações, etc.) são minimizadas, tanto quanto possíveis – todos os componentes ficam sujeitos às mesmas vibrações. Construiu-se uma cobertura com as dimensões $70 \times 50 \times 25 \text{ cm}^3$ para cobrir todo o sistema e assim evitar que a luz exterior interfira com as medições e com o sistema. O interior desta cobertura encontra-se pintado de preto mate na sua totalidade para evitar reflexões de feixes parasitas do laser.

4.1.1 Laser

O laser escolhido pelo bom desempenho demonstrado depois de muitos testes e ensaios foi o MTOLASER com um comprimento de onda de 532 nm, uma *spot* com um diâmetro de 5 mm, uma potência de 100 mW e alimentado a 12 V e equipado com um ventilador capaz de dissipar o calor permitindo que a intensidade do feixe não se altere, permanecendo constante, mesmo quando utilizado por longos períodos.

4.1.2 Divisor de feixe

O cubo semitransparente e divisor de feixe ótico é colocado e alinhado a uma distância de 28 mm da saída do laser e a sua aresta mede 10 mm como ilustrado na figura 4.4. Encontra-se a uma distância de 22 mm de ambos os espelhos e devidamente alinhado. Este divisor de feixe reflete 50% do feixe incidente e transmite os 50% restantes.

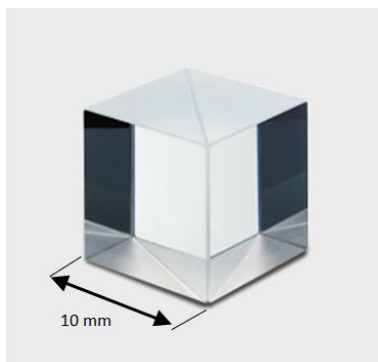


Figura 4.4 – Divisor de feixe ótico idêntico ao utilizado, reflete 50% e transmite 50% do feixe incidente [42].

4.1.3 Suporte dos espelhos

São colocados sobre a mesa de ferro dois suportes de espelhos cinemáticos KM100 da *Thorlabs, Inc.*, um em cada ramo do interferômetro. Têm uma cavidade de 25.4 mm e são capazes de inclinar até 4°. Esta peça servirá de suporte tanto para o porta amostras como para o espelho vibrante, ambos descritos nas secções seguintes (4.1.4 e 4.1.5, respetivamente). Uma imagem do suporte cinemático encontra-se na figura 4.5:



Figura 4.5 – Suporte de espelhos cinemático KM100 da *Thorlabs, Inc.*, utilizado para suporte do porta amostras e do espelho vibrante.

4.1.4 Porta amostras

Uma das faces da amostra é encostada a um eléctrodo de latão (que irá conduzir a tensão aplicada) que por sua vez é encostada ao suporte de *teflon* que serve de isolante. Este suporte tem uma espessura de 6.5 mm e um raio 12.5 mm para ser fixo ao suporte de espelhos cinemático KM100. A outra face é encostada a um encaixe de bronze, construído à medida, que servirá também como condutor. A este encaixe de bronze é então fixado o espelho. O espelho tem um diâmetro de 7 mm e a amostra um diâmetro de 6.5 mm, pelo que a abertura do suporte de *teflon* tem um diâmetro ligeiramente superior, 6.8 mm, assim como o diâmetro do encaixe de bronze. Uma imagem do suporte da amostra pronto a utilizar com todos os componentes necessários e fixos, encontra-se na figura 4.6:

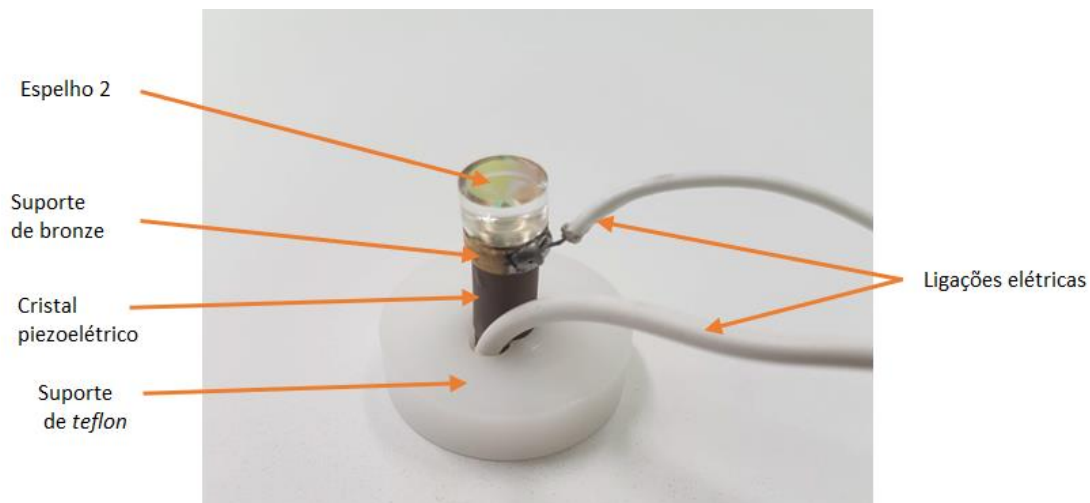


Figura 4.6 – Imagem da montagem do suporte de teflon e do suporte de bronze que fixam o cristal piezoelétrico entre eles e ainda o espelho 2 que é fixado ao suporte de bronze.

4.1.5 Espelho vibrante

Um espelho vibrante (espelho 1) foi fixado a um transdutor piezoelétrico e este último fixado ao suporte de espelhos cinemático KM100 apenas em dois pontos para que a sua deformação não seja afetada. Esta deformação que resulta do efeito piezoelétrico inverso e é consequência da excitação através da aplicação de uma dada tensão ao transdutor. O espelho 1, como é idêntico ao espelho 2, tem o mesmo diâmetro (ver secção 4.1.4) e o transdutor piezoelétrico tem um diâmetro interno de 18 mm e um diâmetro externo de 25 mm. Uma imagem de um transdutor piezoelétrico semelhante ao utilizado encontra-se na figura 4.7:

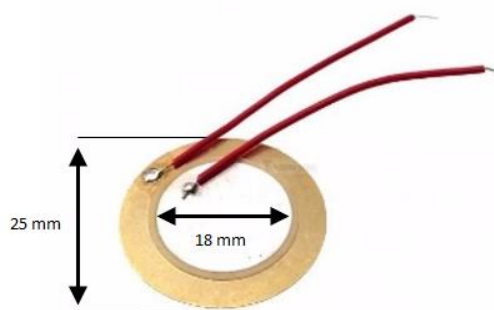


Figura 4.7 – Imagem do transdutor piezoelétrico idêntico ao utilizado para fazer mover o espelho 2 de posição [43].

4.1.6 Detetor

O detetor encontra-se a uma distância de 40 cm do divisor de feixe e, portanto, fora da mesa de ferro, mas fixado a uma bancada ótica. Trata-se do modelo DET110 da *ThorLabs, Inc.*, um fotodetector de silício de alta-velocidade que mede a corrente elétrica através do efeito fotoelétrico produzido no fotodíodo e a converte para tensão. Foi colocada uma fenda à entrada do detetor com um diâmetro de 0.75 mm para melhorar a visualização das franjas de interferência. Adicionou-se um filtro ótico de densidade neutra com uma absorção de 0.5, ou seja, absorve metade e transmite metade da intensidade do feixe sem qualquer alteração da direção do mesmo. Este filtro foi necessário por forma a evitar a saturação do fotodetector. Na tabela 4.1 encontram-se as principais características do fotodetector referido e na figura 4.8 é mostrada uma imagem do filtro ótico e do fotodetector utilizado

Tabela 4.1 – Características do fotodetector DET110 da *ThorLabs, Inc.* utilizado no interferómetro.

Detetor	<i>PIN</i> de silício	Área ativa	13 mm ²
Resposta Espectral	350 – 1100 nm	Corrente escura	10 nA
Comprimento de onda de pico	960 ± 50 nm	Limite de linearidade	1mW

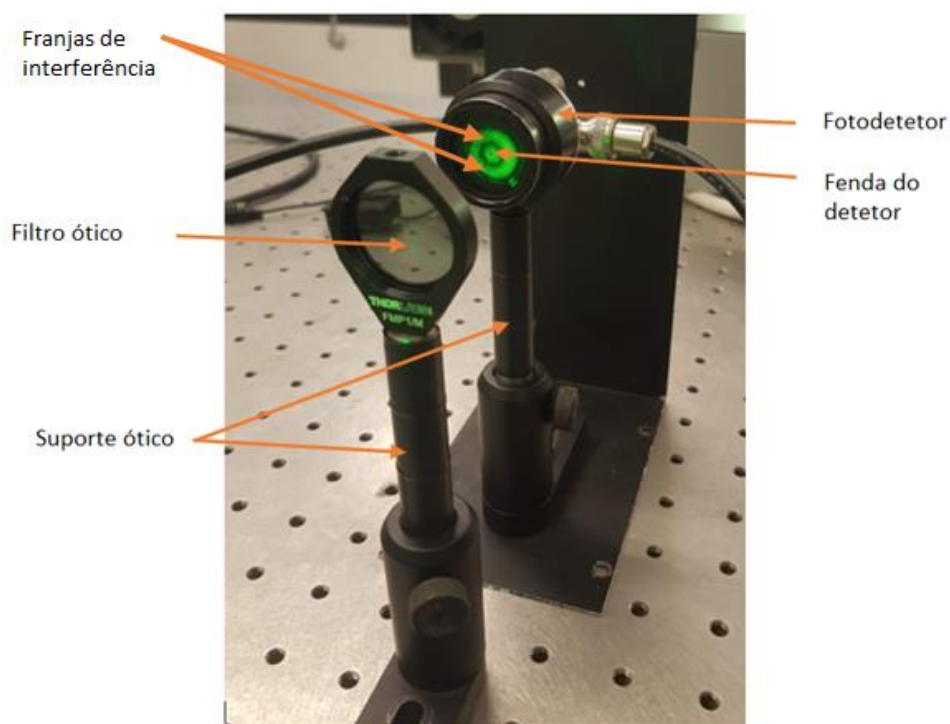


Figura 4.8 – Imagem do fotodetector e do filtro ótico utilizados e devidamente alinhados.

Para ajustar o sinal de saída foi colocada uma resistência de carga, externa, de $55\text{ k}\Omega$ entre o detector e a terra. Um esquema do circuito do detector encontra-se na figura 4.9:

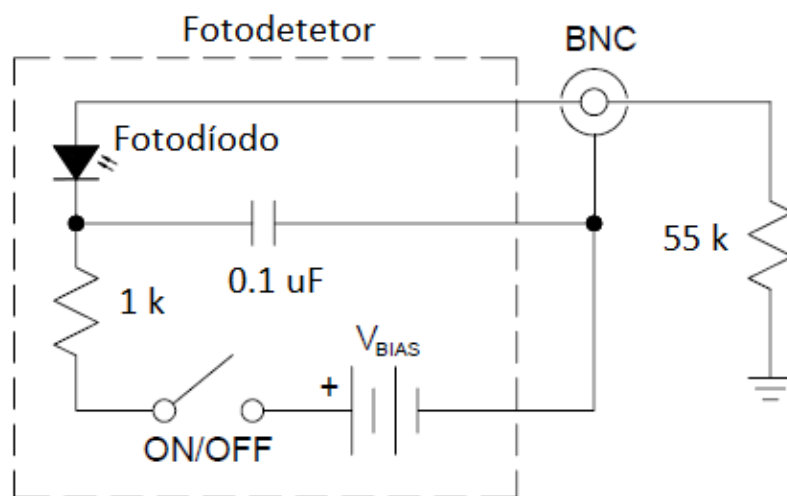


Figura 4.9 – Esquema do circuito interno do fotodetector bem como a resistência de carga, externa, (55 K) adicional (adaptado de [44]).

O sinal do detector é registado através da placa de aquisição de dados SCB-68 da *National Instruments* onde é convertido e lido no computador utilizando o programa *Signal Express*, também da *National Instruments*.

4.2 ELETRÓNICA DESENVOLVIDA

Na medição do coeficiente piezoelétrico através do método automático (explicada mais à frente na secção 4.3.4) o espelho 1 é feito vibrar com uma determinada frequência através do transdutor piezoelétrico a que se encontra fixado. O transdutor piezoelétrico é excitado através de um gerador de rampa construído especialmente para este fim. O gerador de rampa está dividido em 2 etapas: um oscilador e um integrador amplificador.

4.2.1 Oscilador

Um esquema do oscilador usado encontra-se esquematizado na figura 4.10:

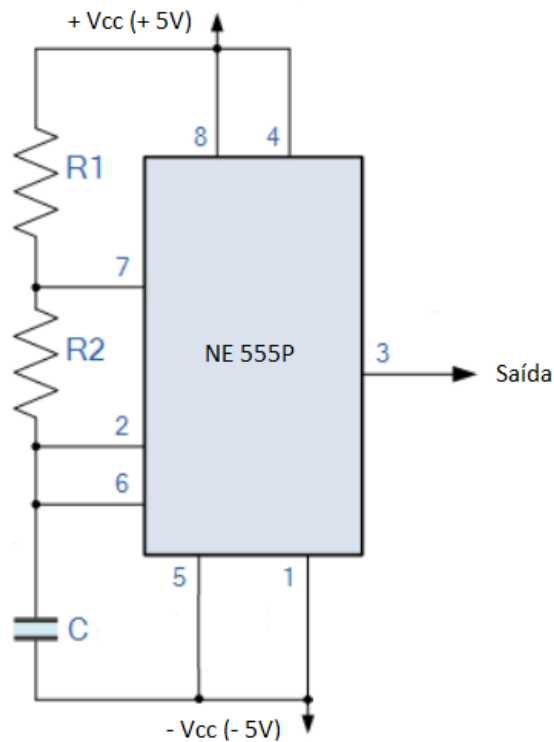


Figura 4.10 – Esquema do circuito do oscilador implementado (adaptado de [45]).

Sendo $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 36 \text{ M}\Omega$ e $C = 1 \text{ }\mu\text{F}$. De notar que devido ao valor de R_2 ser muitíssimo elevado, esta resistência foi substituída por 5 resistências colocadas em série, cada uma de $7,2 \text{ M}\Omega$

É utilizado um temporizador de precisão NE 555P que se comporta como um oscilador e é alimentado com -5 V e $+5 \text{ V}$. À saída (pin 3) o resultado é uma onda quadrada que oscila entre $+5 \text{ V}$ e -5 V quando é positiva e negativa, respetivamente, com tempos aproximadamente iguais, como ilustrado na figura 4.11:

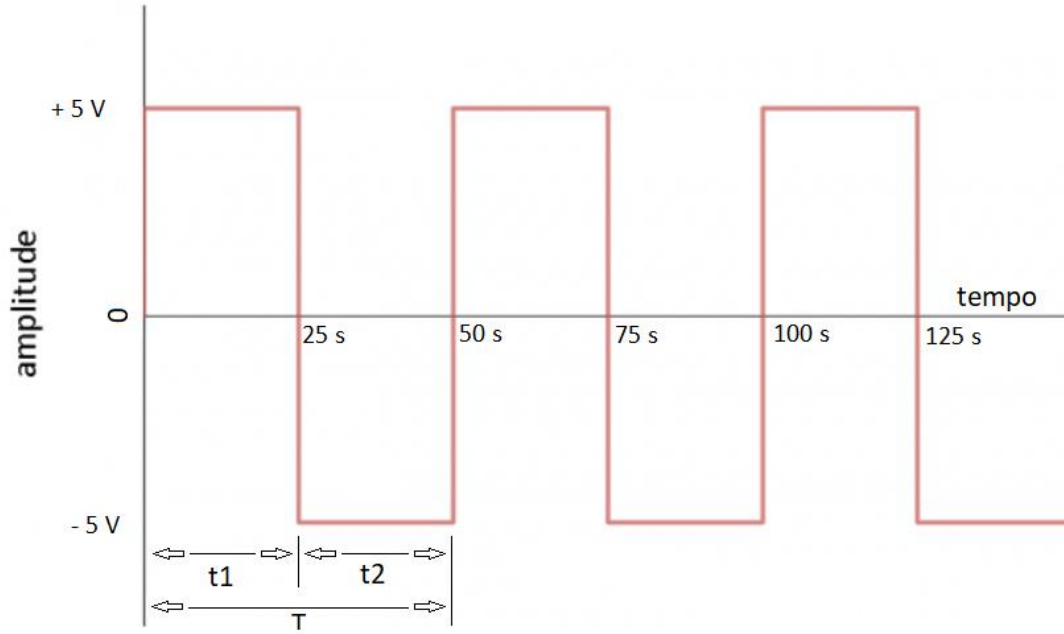


Figura 4.11 – Representação do sinal à saída do oscilador implementado. Trata-se de uma onda quadrada que varia entre +5 V e -5 V (adaptado de [46]).

O tempo em que o sinal é positivo, t_1 , é dado por [45]:

$$t_1 = 0,693(R_1 + R_2)C \quad (4.1)$$

O tempo em que o sinal é negativo, t_2 , é dado por [45]:

$$t_2 = 0,693R_2C \quad (4.2)$$

Assim, o sinal é positivo durante 24,95 s e negativo durante 24,95 s, ou seja, aproximadamente 25 s cada intervalo realizando um período, T , de aproximadamente 50 s.

A frequência de oscilação, f , sendo o inverso do período, T , é dada por [45]:

$$f = \frac{1}{T} \quad (4.3)$$

Posto isto, este sistema oscila, aproximadamente, com uma frequência de 0,02 Hz.

4.2.2 Integrador

Como o objetivo final é obter uma rampa (onda triangular), é necessário integrar e amplificar o sinal quadrado resultante do oscilador. Para isso, é utilizado um circuito integrador com base no amplificador operacional LT1012 como se encontra ilustrado na figura 4.12. A escolha deste integrado deve-se sobretudo ao facto de apresentar uma tensão de *offset* mínima e, portanto, desprezável, e de suportar uma tensão de alimentação até ± 36 V visto que é necessária uma tensão de saída pico a pico acima dos 20 V.

O ganho, G , de tensão é dado por [47]:

$$G = \frac{R_2}{R_1} \quad (4.4)$$

Como este circuito também se comporta como um filtro passa-baixo, a frequência de corte, f_c , é importante e é dada por [47]:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_2 C} \quad (4.5)$$

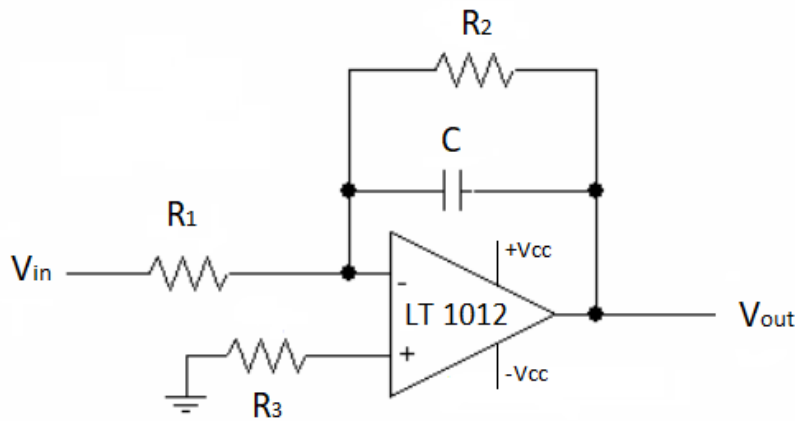


Figura 4.12 – Esquema do integrador amplificador implementado utilizando o amplificador operacional LT 1012 (adaptado de [47]).

sendo $R_1 = 350 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 1 \text{ M}\Omega$, $R_3 = 260 \text{ k}\Omega$, $C = 1 \text{ }\mu\text{F}$ $+V_{cc} = +15 \text{ V}$ e $-V_{cc} = -15 \text{ V}$

Assim, este integrador apresenta um ganho de, aproximadamente, 2,86 e uma frequência de corte de 0,16 Hz. Como o sinal tem uma frequência inferior à frequência de corte do integrador, 0,02Hz (ver secção 4.2.1), o sinal não é filtrado.

À saída o sinal apresenta-se integrado, ou seja, uma onda triangular (rampa), com uma amplitude de pico a pico de aproximadamente 28,6 V e com um período de 50 s. Na figura 4.13 encontra-se uma representação do sinal obtido para uma melhor compreensão:

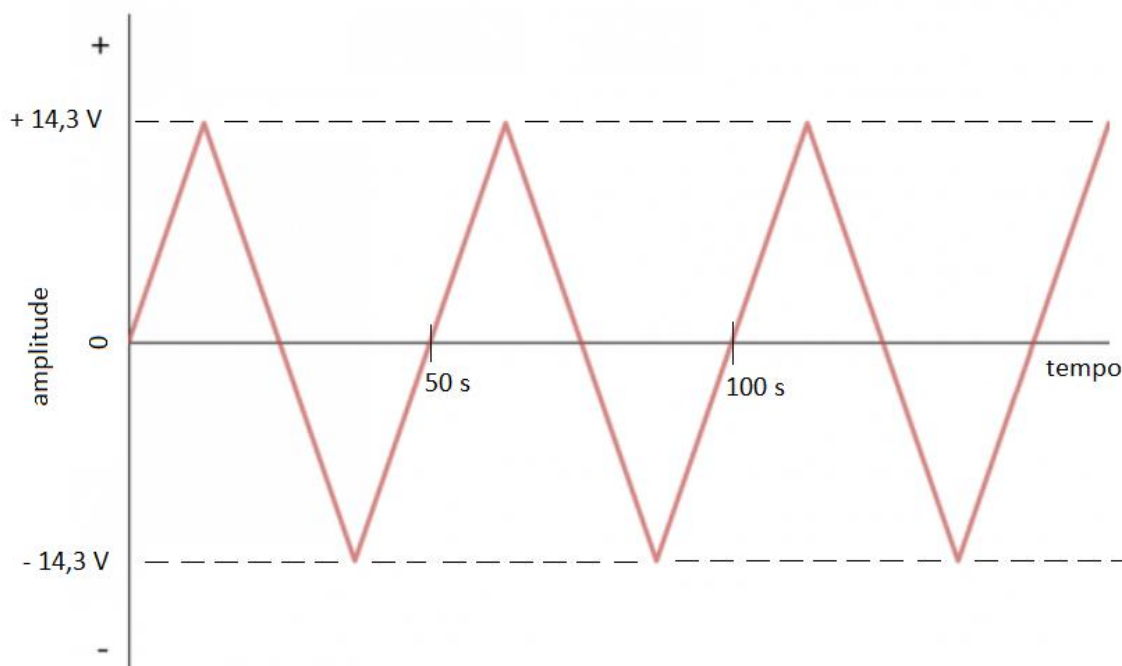


Figura 4.13 – Representação do sinal obtido após a integração. Trata-se de um sinal triangular, em forma de rampa, com uma amplitude pico a pico de aproximadamente 28,6 V e com um período de 50 s (adaptado de [46]).

Este valor de tensão pico a pico ($V_{pp} = 28,6 \text{ V}$) com esta velocidade de varrimento ($T = 50 \text{ s}$) mostrou-se capaz de fazer varrer entre 4 a 5 franjas de interferência com intensidades máximas e mínimas devido à excitação do transdutor piezoelétrico, que por sua vez deforma e faz variar a distância a que o espelho se encontra, resultando na variação do caminho ótico percorrido pelo laser nesse ramo do interferómetro e interferindo com o laser que chega ao divisor do feixe por um caminho ótico diferente.

4.3 OTIMIZAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO INTERFERÓMETRO

A calibração do sistema foi realizada através, da medição do coeficiente piezoelétrico d_{33} de dois cerâmicos piezoelétricos de titanato zirconato de chumbo (PZT) idênticos, por dois métodos distintos: o método de medição manual e o método de medição automático.

4.3.1 PZT

O titanato zirconato de chumbo ($\text{Pb}[\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}]\text{O}_3$ com $0 < x < 1$), mais conhecido por PZT, é um dos materiais cerâmicos piezoelétricos mais conhecido e mais utilizado em todo o mundo. É a escolha preferida da maior parte dos utilizadores por serem fisicamente resistentes, quimicamente inertes e de fabricação relativamente baratos. Podem ser criados e moldados com diversas formas para atenderem a vários propósitos específicos. Comparativamente com outros piezoelétricos cerâmicos, apresenta uma grande sensibilidade e uma temperatura de operação muito alta [48].

Após a segunda guerra mundial, deu-se uma intensa procura por matérias piezoelétricas sintéticas e na década de 40 a URSS e o Japão desenvolveram em conjunto o titanato de bário (BaTiO_3) forçando os EUA a desenvolverem o titanato zirconato de chumbo (PZT) na década de 50 [49].

PZT é um composto cerâmico constituído por inúmeros cristais ferroelétricos que possuem uma estrutura cristalina do tipo perovskita e, por isso com a representação generalizada ABO_3 . Trata-se de uma solução sólida entre o zirconato de chumbo e o titanato de chumbo sendo a sua estrutura uma combinação da estrutura cúbica simples, cúbica de corpo centrado e cúbica de face centrada [50]. Zircónio (Zr) e o titânio (Ti) são os dopantes B e o chumbo (Pb) o dopante A. Variando a razão Zr/Ti consegue-se alterar algumas propriedades do cerâmico piezoelétrico como por exemplo a tenacidade dielétrica. Entretanto foram descobertos outros dopantes A para substituir o Pb de modo a alterar algumas propriedades e até introduzir novas propriedades. Casos como o PZT dopado com lantânio (PLZT) [51], PZT dopado com nióbio (PNZT) [52] e PZT dopado com estrôncio (PSZT) [53] são exemplos de novos cerâmicos piezoelétricos que surgem da adição de dopantes A ou da substituição do Pb por outros elementos [6][48].

Normalmente, os PZT são divididos em dois grupos, os macios (*soft*) e os duros (*hard*). Os macios são normalmente usados quando o alto acoplamento e/ou a alta sensibilidade de carga são importantes como em sensores de fluxo ou de nível, ensaios não destrutivos por ultrassons e inspeções precisas de produtos automotivos, estruturais ou aeroespaciais. As características baseiam-se na alta constante dielétrica, alto acoplamento, alta sensibilidade de carga, alta densidade com estrutura de grãos finos, ponto de Curie alto e uma resposta de frequência limpa e sem ruído. Os duros são usados quando são necessárias grandes potências incluindo aplicações como gerar energia ultrassônica e dispositivos de sonar. Têm como características importantes uma constante (d_{33}) de alta carga piezoelétrica, um fator de qualidade mecânico elevado reduzindo a perda mecânica e, permitindo uma temperatura operacional mais baixa, um baixo fator de dissipação que garante uma operação mais económica e ainda uma alta estabilidade dielétrica [1].

Os valores típicos da constante piezoelétrica d_{33} de cerâmicos piezoelétricos variam entre 20 - 800 m/V ou o equivalente a 20 – 800 C/N. Os cristais utilizados destinam-se a sistemas de ignição, quer isto dizer, são feitos para obter uma descarga elétrica de tensão elevada entre dois elétrodos quando comprimidos. Os cerâmicos piezoelétricos ideais para este efeito são os que têm uma baixa constante piezoelétrica d_{33} . Este tipo de cristais é classificado como duro e segundo os fabricantes, apresentam um coeficiente piezoelétrico $d_{33} = 155 \times 10^{-12}$ m/V, considerando o anexo na página 51. Uma imagem de um dos cerâmicos piezoelétricos utilizados encontra-se na figura 4.14 assim como as dimensões do mesmo:

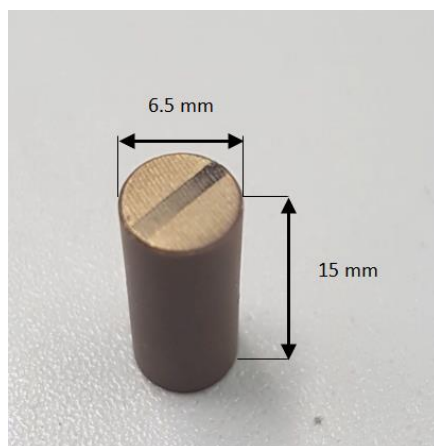


Figura 4.14 – Dimensões do cristal cerâmico piezoelétrico utilizado para a calibração do sistema implementado.

4.3.2 Deposição de alumínio por evaporação térmica

O cristal cerâmico piezoelétrico (amostra) apresenta-se com uma forma cilíndrica e polarizado paralelamente à direção 3 como se encontra esquematizado na figura 4.15:

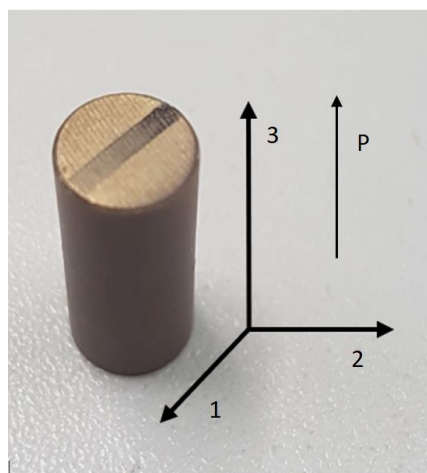


Figura 4.15 – Configuração das direções dos eixos utilizada na amostra de cristal cerâmico piezoelétrico e representação da direção de polarização.

Pretende-se medir o coeficiente piezoelétrico d_{33} e para tal é necessário que a tensão seja aplicada nessa mesma direção, ou seja, entre as duas faces planas da amostra. De modo a garantir que a aplicação da tensão na face da amostra seja uniforme, depositou-se um filme fino de alumínio por evaporação térmica em ambas as faces. Para tal utilizou-se o sistema de evaporação térmica implementado no Laboratório de Plasmas e Aplicações do CEFITEC que se encontra na figura 4.16, o qual é composto por uma câmara de vácuo, uma bomba rotatória, uma bomba turbomolecular e toda a instrumentação associada.

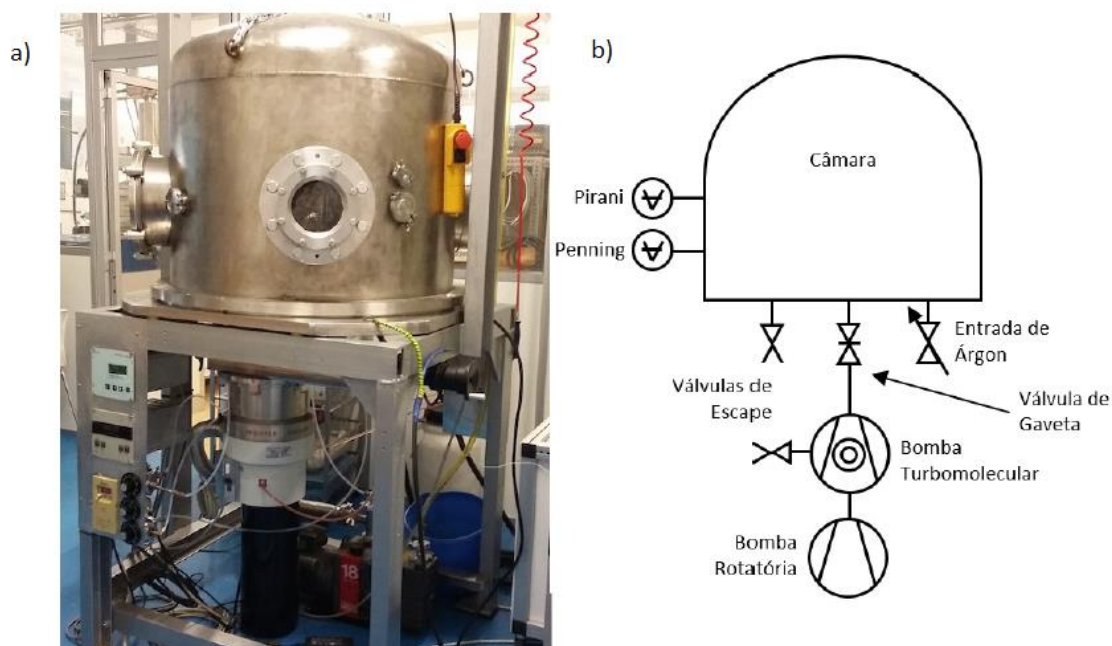


Figura 4.16 – Sistema de vácuo implementado no laboratório de plasmas do CEFITEC: a) Imagem do sistema de vácuo utilizado para a deposição de filmes finos de alumínio nas amostras cerâmicas piezoelétricas com a câmara de vácuo em cima e tanto as duas bombas como a instrumentação associada em baixo; b) Esquema do sistema de vácuo utilizado [54].

Esta técnica consiste em fazer evaporar o material desejado para todas as direções até atingir o substrato, onde condensa e forma um filme fino. Para que o filme seja uniforme e não contenha irregularidades e impurezas, é necessário que todo o processo seja realizado em vácuo. O material que se deseja depositar no substrato é por norma aquecido com recurso a um filamento resistivo de tungsténio capaz de suportar correntes elevadas, na ordem das dezenas de amperes. De referir que quanto mais baixa for a pressão na câmara, menor será o ponto de sublimação do material e por isso menor será a corrente necessária [55].

Como referido anteriormente, o alumínio foi o material que se pretendeu depositar nas faces planas da amostra de PZT. Para tal, utilizou-se um fio de alumínio de alta pureza (*Advent Research Materials*, 99.5%) com poucos centímetros que foi enrolado e fixado ao filamento de tungsténio. As 2 amostras PZT foram colocadas num suporte a cerca de 10 cm de distância com uma das faces voltada para o filamento de tungsténio. De seguida, fechou-se a câmara de vácuo assim como as suas válvulas de escape e abriu-se a válvula de gaveta. Ligou-se a bomba rotatória até a câmara de vácuo atingir uma pressão de aproximadamente 10^{-2} mbar, pressão esta que permite que a bomba turbomolecular seja ligada até ser atingida uma pressão de aproximadamente 4×10^{-5} mbar. A este nível de pressão, a deposição do filme fino sem irregularidades e impurezas é praticamente assegurada. Ligou-se a fonte de corrente elétrica e aumentou-se lentamente o seu valor até a evaporação total ser observada através de uma janela que se encontra na câmara, própria para o efeito. A evaporação total deu-se por volta dos 42 amperes. Por fim, colocou-se a câmara à pressão atmosférica de uma forma controlada para que os filmes finos arrefeçam gradualmente. Visto que se pretendia depositar alumínio nas duas faces das amostras, todo o processo foi repetido alterando apenas a posição das amostras, ou seja, rodando 180° as 3 amostras para que as restantes faces também sejam alvo da deposição de alumínio.

A deposição por evaporação térmica foi bem-sucedida como é possível verificar na figura 4.17. Os filmes finos mostraram ser bons condutores, apresentaram uma boa estabilidade mecânica ao longo de todos os procedimentos experimentais e uma espessura de 125 ± 25 nm, medida através da técnica de Microscopia Eletrónica de Varrimento. Inicialmente os filmes finos seriam utilizados como espelhos para refletirem o laser, mas o padrão rugoso da amostra não permitiu um nível suficiente de regularidade do filme capaz de atuar como um espelho.

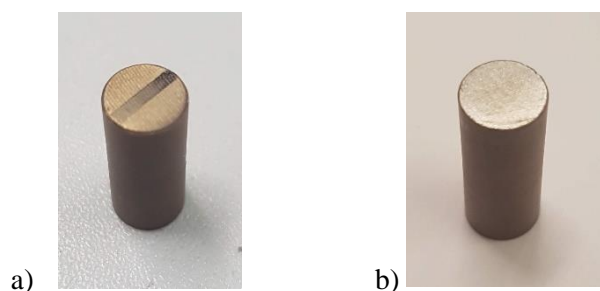


Figura 4.17 – Antes e depois da deposição do filme fino de alumínio numa das faces de uma das amostras cerâmicas piezoelétricas: a) Antes da deposição do filme fino de alumínio; b) Depois da deposição do filme fino de alumínio.

Esta é uma técnica com um procedimento relativamente simples e económico, contudo, apresenta a desvantagem de não ser possível controlar com exatidão a espessura do filme. No entanto, para o trabalho em específico, é uma medida irrelevante pelo que se optou pela utilização desta técnica.

4.3.3 Medição do efeito piezoelétrico através do método manual

A montagem do cristal cerâmico piezoelétrico no porta amostras é feita de acordo com a secção 4.1.4. Antes de qualquer medição e após qualquer alteração no sistema é necessário, sempre, alinhar o interferómetro. O sistema encontra-se alinhado quando o padrão de interferência for circular, estiver centrado no detetor e o contraste ou visibilidade (secção 3.3) das franjas de interferência for máxima. O detetor referido encontra-se previamente alinhado com todo o sistema e permanece imóvel e inalterado ao longo de todas as medições. Depois do alinhamento, cobre-se o sistema com a cobertura para que a luz ambiente da sala não interfira com os resultados. Neste tipo de medição, o espelho 1 encontra-se fixo e a diferença de caminhos óticos é feita através da deslocação do espelho 2. É aplicado ao cristal PZT uma alta tensão que aumenta de uma forma constante: 100 V/s até um máximo de aproximadamente 6 kV. Este é o limite máximo estabelecido para que o sistema se apresente seguro e fiável para quem o utilize. Após este valor, o aparecimento de descargas elétricas entre os elétrodos do sistema são recorrentes e podem interferir com os resultados. Enquanto a tensão aplicada aumenta, é visível o varrimento das franjas no sentido de dentro para fora devido ao efeito piezoelétrico inverso que se manifesta no cristal e o faz deformar, movimentando o espelho 2 e variando o caminho ótico. O detetor adquire os dados a uma velocidade de 1000 aquisições por segundo, ou seja, 1 aquisição a cada milissegundo, resultando num gráfico com uma forma sinusoidal que mostra a tensão registada equivalente em função do tempo.

Analisando a equação 3.4, sabendo que o espelho 1 se encontra fixo, como d traduz a distância que o espelho 2 percorreu, d corresponde também à deformação/deslocação que o cristal cerâmico piezoelétrico efetuou. Assim, considerando a equação 2.2 e a equação 3.4, entre duas franjas consecutivas e por isso, $m = 1$, o coeficiente piezoelétrico d_{33} pode ser escrito na forma:

$$d_{33} = \frac{\lambda}{2 \cdot \Delta V} \quad (4.6)$$

onde ΔV representa a diferença de tensão aplicada entre o descolamento do cristal piezoelétrico inicial e final.

4.3.4 Medição do efeito piezoelétrico através do método automático

Para a medição do efeito piezoelétrico através da via automática, é necessário fazer alguns ajustes no sistema ótico implementado. Mais uma vez, antes de qualquer medição, o sistema precisa sempre de ser alinhado de forma idêntica ao método descrito na secção 4.3.3. Após o alinhamento cobre-se o sistema com a cobertura. Neste método, o cristal piezoelétrico é excitado através do sinal de referência dum amplificador *lock-in* com uma tensão máxima de $V_0 = 8$ V e uma frequência de 2.5 kHz, frequência esta que mostrou ser próxima da frequência de ressonância do cristal. Deste modo, o espelho 2, que se encontra acoplado ao cristal piezoelétrico, irá vibrar a uma frequência constante e conhecida alterando o caminho ótico. Ao mesmo tempo, o espelho 1, que se encontra de frente para o laser, e que no método anterior (secção 4.3.3) se mantinha imóvel, irá também deslocar-se graças ao transdutor piezoelétrico e que se encontra ligado ao gerador de rampa (secção 4.1.5) alterando também o caminho ótico. A frequência com que o espelho 1 vibra é de 2 mHz, ou seja, uma frequência muito inferior quando comparada com a frequência de vibração do espelho 2 (2.5 kHz). Serão obtidos os dois sinais, o sinal de franja e o sinal piezoelétrico mascarado pelo sinal de franja, mas como a frequência de modulação é conhecida, o amplificador *lock-in* pode filtrar o sinal piezoelétrico dos restantes sinais.

Analizando a equação 3.3, a intensidade do sinal que chega ao detetor será máxima e mínima quando $\cos(\Delta\phi) = 1$ e $\cos(\Delta\phi) = -1$, respetivamente, e a sua subtração resulta em:

$$I_{max} - I_{min} = 4E_1E_2 \quad (4.7)$$

Combinando a equação 3.3 com a equação 4.7, obter-se-á:

$$I_{sp} \approx E_1^2 + E_2^2 + \frac{1}{2}(I_{max} - I_{min})\cos(\Delta\phi) \quad (4.8)$$

Como a diferença de caminhos óticos é igual ao dobro da deslocação do espelho, ou seja, igual ao dobro da deformação do cristal piezoelétrico de acordo com a equação:

$$\frac{\Delta p}{p} = 2S_j = 2d_{ij}E_i \quad (4.9)$$

Atendendo à equação 3.5 e à equação 4.9, a diferença de fase devida ao efeito piezoelétrico inverso é dada por:

$$\Delta\phi = \Delta\phi_0 + \frac{2\pi}{\lambda} 2d \cdot V_0 \cos(\Omega t) \quad (4.10)$$

sendo $\Delta\phi_0$ a diferença de fase inicial sem efeito piezoelétrico e $V_0 \cos(\Omega t)$ a diferença de potencial aplicada ao cristal (potencial de modulação).

Substituindo $\Delta\phi$ na equação 4.8 e considerando-se os termos que oscilam com a frequência de modulação (Ω), a intensidade do sinal que chega ao fotodetetor é agora escrita na forma:

$$|I_{sp}| \approx \frac{1}{2} |I_{max} - I_{min}| \frac{2\pi}{\lambda} d \cdot V_0 \cos(\Omega t) \sin(\Delta\phi_0) \quad (4.11)$$

Como o ângulo $\Delta\phi_0$ ($f = 2 \text{ mHz}$) é feito variar linearmente com o tempo (t) a uma frequência muito inferior a Ω ($f = 2.5 \text{ kHz}$), pelo espelho 1 que se encontra fixo ao transdutor piezoelétrico, o sinal piezoelétrico $\cos(\Omega t)$ está desfasado $\pi/2$ do sinal da franja $\sin(\Delta\phi_0)$ como se encontra esquematizado na figura 4.18 assim como o resultado da equação 4.11.

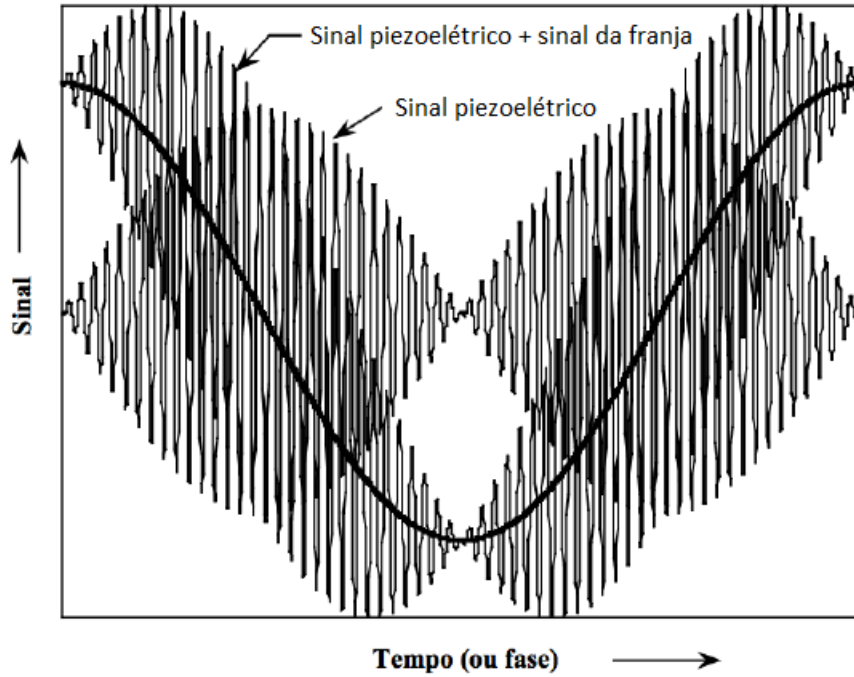


Figura 4.18 – Ilustração do sinal de modulação piezoelétrico de um feixe de luz medido no interferómetro desenvolvido através do método de medição automático [56].

Assim, a amplitude do sinal piezoelétrico será:

$$|I_{sp}| \approx |I_{max} - I_{min}| \frac{\pi}{\lambda} d \cdot V_0 \quad (4.12)$$

Ou seja, o sinal piezoelétrico medido é proporcional à diferença das intensidades máximas e mínimas da franja da interferência.

Por sua vez, o coeficiente piezoelétrico d_{33} é escrito na forma:

$$d_{33} = \frac{|I_{sp}|}{|I_{max} - I_{min}|} \frac{\lambda}{\pi V_{pp}} \quad (4.13)$$

4.4 RESULTADOS

Este subcapítulo apresenta o resultado da calibração do sistema desenvolvido através dos métodos manuais e automáticos, descritos nas secções 4.3.2 e 4.3.3.

Em ambos os métodos, durante o alinhamento o sistema mostrou ser coerente e estável apresentando sempre um padrão de interferência muito semelhante em todas as medições. Através da equação 3.2 e das amplitudes máximas e mínimas obtidas dos sinais das várias franjas produzidas, calculou-se a visibilidade destas mesmas franjas obtendo-se valores nunca inferiores a 0.80. Uma imagem do padrão de franjas produzido encontra-se na figura 4.19:

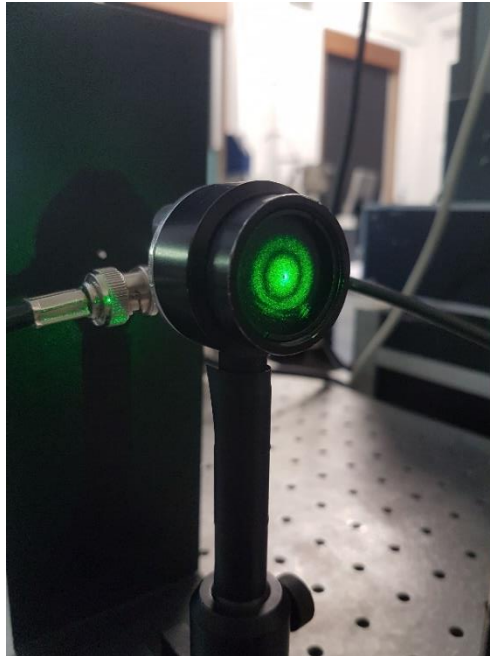


Figura 4.19 – Imagem do padrão de franjas produzido durante a calibração por dois métodos de medida com uma visibilidade de franjas superior a 0.80 segundo a equação 3.2.

De salientar que, como a imagem se encontra à luz ambiente, a discriminação a olho nu das franjas produzidas pode induzir em erro uma vez que as amplitudes máximas e mínimas dos sinais das franjas foram obtidas com o sistema coberto pela cobertura negra melhorando significativamente a visibilidade das franjas de interferência.

4.4.1 Método Manual

As figuras 4.20 e 4.21 mostram a característica linear resultante da deformação piezoelétrica em função da tensão aplicada (ΔV), dos cerâmicos piezoelétricos 1 e 2, respetivamente, em concordância com a equação:

$$X = d_{33}\Delta V \quad (4.14)$$

Através do cálculo do declive das retas dos cerâmicos piezoelétricos 1 e 2, representadas nas figuras 4.20 e 4.21, pode-se obter os coeficientes piezoelétricos d_{33} correspondentes, apresentados na tabela 4.2.

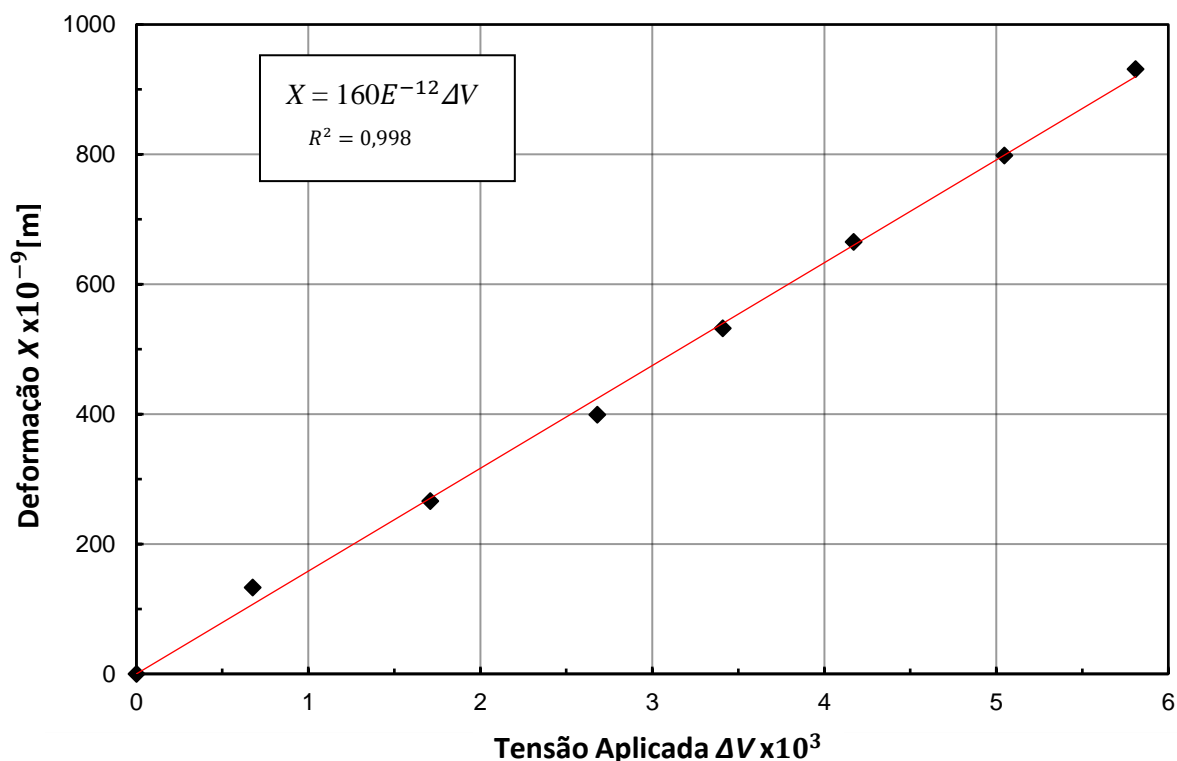


Figura 4.20 – Característica linear resultante do efeito piezoelétrico do cerâmico piezoelétrico 1 e resultante da equação 4.7.

A equação $X = 160 \times 10^{-12} \Delta V$, da figura 4.20, apresenta um coeficiente de correlação de 0,998 e uma incerteza do declive da reta de 0,03.

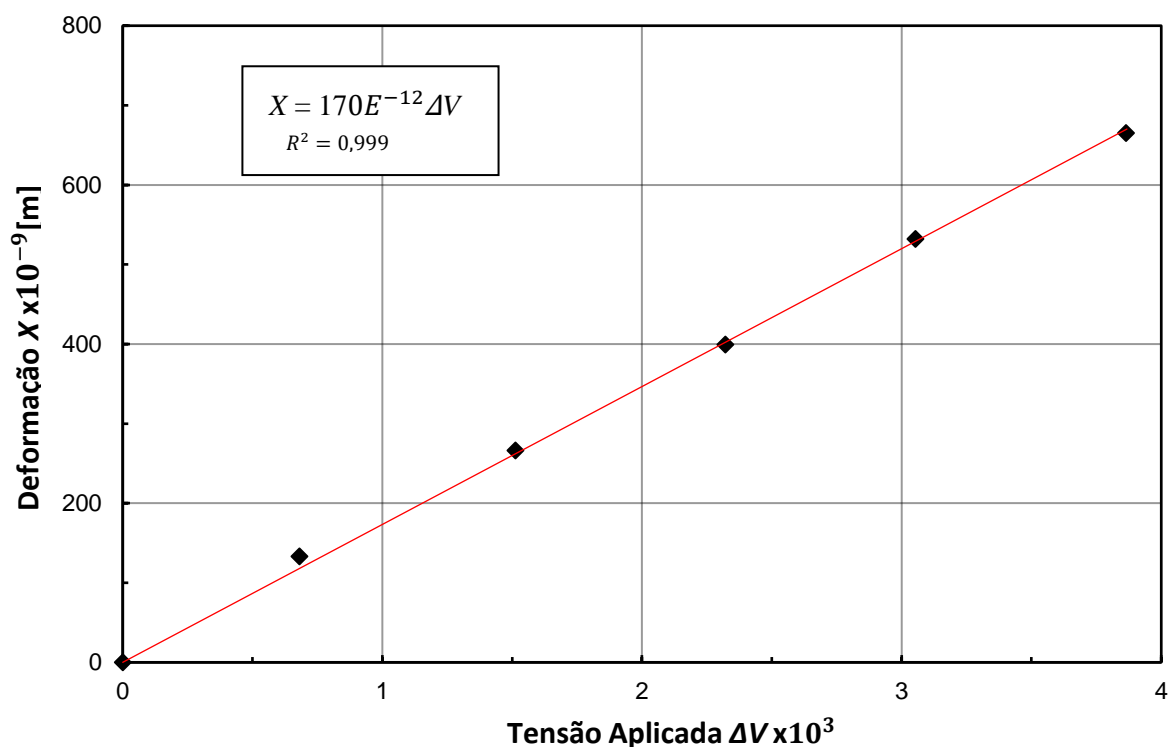


Figura 4.21 – Característica linear resultante do efeito piezoelétrico do cerâmico piezoelétrico 2 e resultante da equação 4.7.

A equação $X = 170 \times 10^{-12} \Delta V$, da figura 4.21, apresenta um coeficiente de correlação de 0,999 e uma incerteza do declive da reta de 0,002.

Tabela 4.2 – Valores do coeficiente piezoelétrico d_{33} obtidos para os cerâmicos PZT 1 e 2 pelo método manual.

Material	Valor obtido $\times 10^{-12} (m/V)$
PZT 1	$d_{33} = 160 \pm 20$
PZT 2	$d_{33} = 170 \pm 10$

4.4.2 Método Automático

Para se proceder à calibração do sistema através do método automático foi utilizada a equação 4.13 na forma:

$$\frac{|I_{sp}|}{|I_{max} - I_{min}|} = d_{33} \frac{\pi}{\lambda} V_{pp} \quad (4.15)$$

Semelhante ao efetuado na medição pelo método manual (secção 4.4.1), se o valor da razão $\frac{|I_{sp}|}{|I_{max} - I_{min}|}$ for representado em função do potencial de modulação (V_{pp}) pode-se calcular o coeficiente piezoelétrico d_{33} através do declive da reta obtida. Nestas condições, as figuras 4.22 e 4.23 representam as retas obtidas para os cerâmicos 1 e 2 e a tabela 4.3 apresenta os valores dos coeficientes piezoelétricos d_{33} obtidos para ambos os cristais.

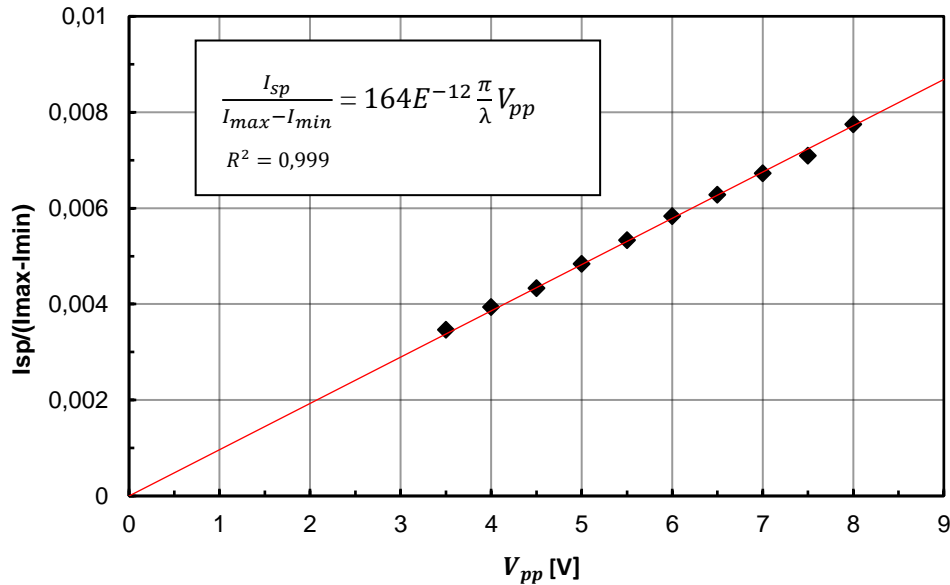


Figura 4.22 – Característica linear resultante do efeito piezoelétrico do cerâmico piezoelétrico 1 e resultante da equação 4.8.

A equação $\frac{I_{sp}}{I_{max}-I_{min}} = 164E^{-12} \frac{\pi}{\lambda} V_{pp}$, da figura 4.22, apresenta um coeficiente de correlação de 0,999, um declive de $9,4E^{-4}$ e uma incerteza do declive da reta de $1E^{-5}$.

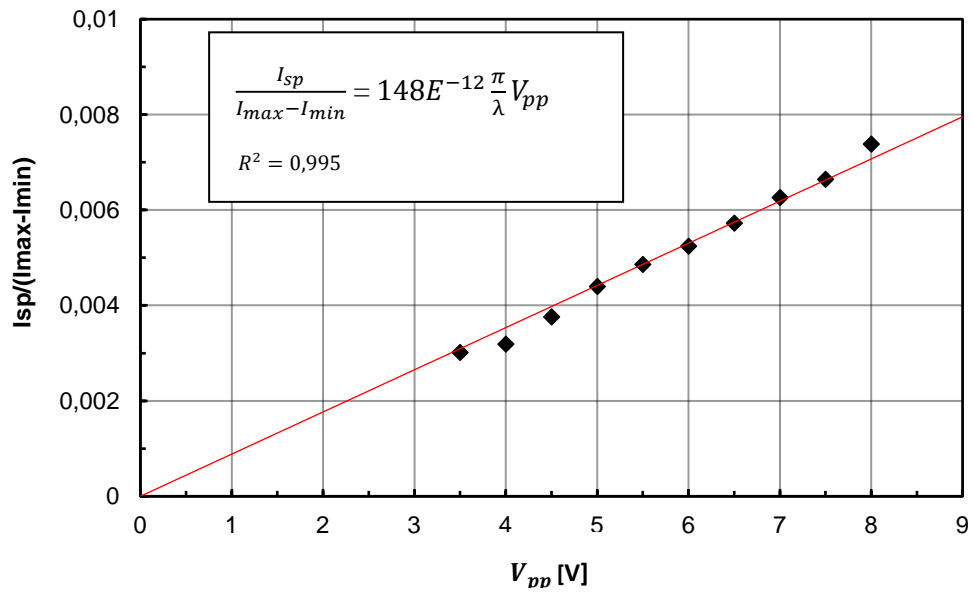


Figura 4.23 - Característica linear resultante do efeito piezoelétrico do cerâmico piezoelétrico 2 e resultante da equação 4.8.

A equação $\frac{I_{sp}}{I_{max}-I_{min}} = 148E^{-12} \frac{\pi}{\lambda} V_{pp}$, da figura 4.23, apresenta um coeficiente de correlação de 0,995, um declive de $9,2E^{-4}$ e uma incerteza do declive da reta de $3E^{-5}$.

Tabela 4.3 – Valores do coeficiente piezoelétrico d_{33} obtidos para os cristais PZT 1 e 2 pelo método automático.

Material	Valor obtido $\times 10^{-12}$ (m/V)
PZT 1	$d_{33} = 164 \pm 2$
PZT 2	$d_{33} = 148 \pm 6$

Analisando e comparando as tabelas 4.2 e 4.3, pode-se verificar que os valores dos coeficientes piezoelétricos d_{33} de ambos os cristais são muito semelhantes entre eles, independentemente do tipo de método de medida utilizado. De notar que os desvios padrões no método automático são inferiores quando comparados com os desvios padrões do método manual. Esta diferença acontece porque o método automático demonstrou ser menos afetado por interferências externas como o ruído sonoro. Para o cristal 1 foram obtidos os valores nominais 160 ± 20 m/V e 164 ± 2 m/V para as medições pelos métodos manual e automático, respetivamente, e para o cristal 2 obteve-se os valores

nominais 170 ± 10 m/V e 148 ± 6 m/V para os mesmos métodos, respetivamente. Segundo empresas de fabrico deste género de cristais, os coeficientes piezoelétricos d_{33} obtidos encontram-se em conformidade com o valor esperado, 155 m/V, podendo assim, estes dois cristais, serem classificados como cerâmicos piezoelétricos duros, considerando o anexo na página 51. Posto isto, pode-se considerar que o sistema se encontra devidamente otimizado, calibrado e pronto para futuras medições.

5 CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS

O trabalho apresentado nesta dissertação consistiu no desenvolvimento de um sistema para medição do efeito piezoelétrico.

Neste contexto, foi desenhada, construída, otimizada e calibrada uma bancada ótica destinada à medição do efeito piezoelétrico, baseada numa técnica interferométrica a qual permite medira diferença de fase entre dois ramos de um interferómetro de Michelson.

A calibração do interferómetro foi realizada medindo-se, através de dois métodos distintos, manual e automático, os coeficientes piezoelétricos d_{33} de dois cristais PZT comerciais classificados como duros e com um coeficiente piezoelétrico d_{33} conhecido.

Pelos dois métodos distintos, manual e automático, um dos cristais apresentou valores nominais de 160 ± 20 m/V e 164 ± 2 m/V, respetivamente, e o outro cristal apresentou valores nominais de 170 ± 10 m/V e 148 ± 6 m/V, respetivamente. Estes resultados validam o sistema por se encontrarem dentro do intervalo do valor esperado de 155 m/V, segundo dados do fabricante.

Considerando-se os resultados obtidos e apresentados ao longo desta dissertação, conclui-se que os objetivos inicialmente propostos foram atingidos, uma vez que o sistema se encontra devidamente calibrado e pronto a ser utilizado para futuras medições, sendo apenas necessário fazer algumas alterações no porta amostras para o adequar à forma da amostra a medir.

De forma a melhorar o sistema para futuros trabalhos, dada a dificuldade no alinhamento do interferómetro, necessária previamente a qualquer medição devido à elevada sensibilidade do mesmo, seria interessante instalar este sistema num laboratório mais restrito onde a presença de pessoas no edifício seria restrita de forma a evitar todo e qualquer tipo de ruído sonoro. Um sistema de alinhamento mecanizado e automatizado também seria importante visto que a imprecisão dos movimentos das mãos no alinhamento dos espelhos mostrou ser desfavorável para um fácil e adequado alinhamento do sistema previamente a qualquer medição.

BIBLIOGRAFIA

- [1] E. Seyedhosseini, «Piezoelectricity and Ferroelectricity in Amino Acid Glycine», Tese de Doutorado, Universidade de Aveiro, 2015.
- [2] H. S. Nalwa, «Journal of Macromolecular Science-Reviews in Macromolecular Chemistry and Physics», vol. 4, n. C13, p. 341, 1991.
- [3] D. Damjanovic, «Ferroelectric , dielectric and piezoelectric properties of ferroelectric thin films and ceramics», vol. 61, pp. 1267–1324, 1998.
- [4] D. Damjanovic, «Hysteresis in Piezoelectric and Ferroelectric Materials», em *The Science of Hysteresis*, vol. 3, I. Mayergoyz e G. Bertotti, Eds. Lausanne, Switzerland: Elsevier Ltd, 2005, pp. 337–465.
- [5] Aerotech, «Piezo Engineering Tutorial». [Em linha]. Disponível em: <https://www.aerotech.com/product-catalog/piezo-nanopositioners/piezo-engineering-tutorial.aspx>. [Acedido: 10-Jun-2019].
- [6] W. Heywang, K. Lubitz, e W. Wersing, *Piezoelectricity Evolution and Future of a Technology*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [7] S. Datta, «Piezoelectric Materials: Crystal Orientation and Poling Direction», 2014. [Em linha]. Disponível em: <https://www.comsol.com/blogs/piezoelectric-materials-crystal-orientation-poling-direction/>. [Acedido: 15-Jun-2019].
- [8] S. Katzir e Z. Buchwald, J., «The Discovery of the Piezoelectric Effect», vol. 57, pp. 61–91, 2003.
- [9] M. Materials, S. Mishra, e L. Unnikrishnan, «Advances in Piezoelectric Polymer Composites for Energy Harvesting Advances in Piezoelectric Polymer Composites for Energy Harvesting Applications : A Systematic Review», n. November, 2018.
- [10] W. G. Cady, *Piezoelectricity*. McGraw-Hill, New York and London, 1946.
- [11] G. C. Rodrigo, «Analysis and design of Piezoelectric sonar transducers», Tese de Doutorado. University of London, 1970.
- [12] H. Li, P. Northwest, Z. D. Deng, P. Northwest, T. Carlson, e P. Northwest, «Piezoelectric Materials Used in Underwater Acoustic Transducers», n. March, 2012.
- [13] S. Sonmezoglu, S. T. Block, Y. Kusano, J. M. Tsai, R. Amirtharajah, e D. A. Horsley, «MONOLITHIC PIEZOELECTRIC ALUMINUM NITRIDE MEMS-CMOS MICROPHONE University of California , Davis , USA ABSTRACT», pp. 414–417, 2017.
- [14] Metra Mess- und Frequenztechnik, «Piezoelectric Accelerometers», 2001.
- [15] F. Levassort, L. P. Tran-huu-hue, D. Certon, e M. Lethiecq, «PIEZOELECTRIC MATERIALS FOR ULTRASONIC TRANSDUCERS: REVIEW OF RECENT DEVELOPMENTS», *Lab. d’Ultrasons, Signaux Instrum. / GIP Ultrason.*, p. 6.
- [16] H. Search, C. Journals, A. Contact, M. Iopscience, e I. P. Address, «Piezoelectric Effect in Polarized Poly (vinylidene Fluoride)», vol. 960.

- [17] Z. Kai, D. Xinghui, e W. Dongsheng, «Intelligent Vibration Control of Piezo-electric Truss Structure Using GA-based Fuzzy Neural Network *», pp. 5136–5139, 2010.
- [18] H. Boukabache, C. Escriba, e J. Fourniols, «Toward Smart Aerospace Structures: Design of a Piezoelectric Sensor and Its Analog Interface for Flaw Detection», *Sensors*, pp. 20543–20561, 2014.
- [19] R. Bansevi, S. Navickait, V. J. e A. Bubulis, «Piezoelectric actuator for micro robot used in nanosatellite», vol. 1, pp. 2008–2014, 2014.
- [20] F. A. C. Viana e V. Steffen, «Multimodal Vibration Damping through Piezoelectric Patches and Optimal Resonant Shunt Circuits», vol. XXVIII, n. 3, 2006.
- [21] J. G. Rocha, L. M. Goncalves, P. F. Rocha, e M. P. Silva, «Energy Harvesting From Piezoelectric Materials Fully Integrated in Footwear», n. May 2014, 2010.
- [22] T. Ikeda, «Fundamentals of Piezoelectricity», *Zeitschrift für Krist.*, vol. 199, n. 1–2, pp. 158–158, 1990.
- [23] D. S. Melo *et al.*, «Lanthanum-based perovskites obtained by the polymeric precursor method», *J. Mater. Sci.*, vol. 43, n. 2, pp. 551–556, 2008.
- [24] J. B. M. Wanderley, F. M. M. Borges, J. P. Ribeiro, P. M. Pimentel, e D. M. A. Melo, «Síntese e estudo microestrutural de perovskita do tipo $\text{La}_{0,8}\text{Ca}_{0,2}\text{MO}_3$ (M = Co ou Mn) com gelatina como precursor orgânico para aplicação em catálise automotiva», *Ceramica*, vol. 59, n. 349, pp. 156–159, 2013.
- [25] S. Priya, H. Song, Y. Zhou, R. Varghese, e A. Chopra, «A Review on Piezoelectric Energy Harvesting : Materials , Methods , and Circuits», vol. 4, n. 1, pp. 3–39, 2017.
- [26] F. Nye, *Physical Properties of Crystals: Their Representation by Tensors and Matrices*. New York: Oxford University Press, 2008.
- [27] Physik Instrumente, «Fundamentals of Piezo Technology». [Em linha]. Disponível em: <https://www.physikinstrumente.com/en/technology/piezo-technology/fundamentals/>. [Acedido: 18-Jun-2019].
- [28] A. Safari, *Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducer Applications*. Piscataway, 2008.
- [29] M. Stewart, W. Battrick, e M. Cain, «Measuring Piezoelectric d 33 coefficients using the Direct Method», Teddington, Middlesex, United Kingdom, 2001.
- [30] Z. Huang, Q. Zhang, S. Corkovic, R. Dorey, e R. W. Whatmore, «Comparative Measurements of Piezoelectric Coefficient of PZT Films by Berlincourt , Interferometer , and Vibrometer Methods», vol. 53, n. 12, pp. 2287–2293, 2006.
- [31] I. Transactions e O. N. Instrumentation, «Comparison of Methods for the Measurement of Piezoelectric Coefficients», vol. 62, n. 5, pp. 1047–1057, 2013.
- [32] D. Seol, B. Kim, e Y. Kim, «Non-piezoelectric effects in piezoresponse force microscopy», *Curr. Appl. Phys.*, vol. 17, n. 5, pp. 661–674, 2017.
- [33] B. J. Rodriguez, S. V Kalinin, J. Shin, S. Jesse, e V. Grichko, «Electromechanical imaging of biomaterials by scanning probe microscopy», vol. 153, pp. 151–159, 2006.
- [34] Q. Guo, G. Z. Cao, e I. Y. Shen, «Measurements of Piezoelectric Coefficient d 33 of Lead

- Zirconate Titanate Thin Films Using a Mini Force Hammer», vol. 135, n. February, pp. 1–9, 2013.
- [35] N. Tiwary, R. Sarkar, V. R. Rao, e A. Laha, «Piezoresponse Force Microscopy (PFM) characterization of GaN nanowires grown by Plasma Assisted Molecular Beam Epitaxy», *2016 Jt. IEEE Int. Symp. Appl. Ferroelectr. Eur. Conf. Appl. Polar Dielectr. Piezoelectric Force Microsc. Work.*, pp. 1–4, 2016.
 - [36] P. Hariharan, *Basics of Interferometry*, Second Edi., n. c. Sydney, Australia: Elsevier Ltd, 2007.
 - [37] Joe, «Waves Revision». [Em linha]. Disponível em: <https://waves.neocities.org/superposition.html>. [Acedido: 31-Jul-2019].
 - [38] Wikipedia, «Interferometric visibility», 2019. [Em linha]. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Interferometric_visibility. [Acedido: 05-Jul-2019].
 - [39] J. F. Li, P. Moses, e D. Viehland, «Simple, high-resolution interferometer for the measurement of frequency-dependent complex piezoelectric responses in ferroelectric ceramics», *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 66, n. 1, pp. 215–221, 1995.
 - [40] A. You, M. A. Y. Be, e I. In, «Laser interferometer for the study of piezoelectric and electrostrictive strains», vol. 2492, n. June, 1998.
 - [41] G. Barreto, «Desenvolvimento de um Sistema para a Medição do Efeito Electroóptico», Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 2015.
 - [42] MediaLas, «No Title». [Em linha]. Disponível em: <https://www.lasershop.de/en/polcube-blue-450nm.html>. [Acedido: 10-Jul-2019].
 - [43] Tinkersphere, «No Title». [Em linha]. Disponível em: <https://tinkersphere.com/sensors/1322-27mm-piezo-element-vibration-knock-sensor.html>. [Acedido: 19-Jul-2019].
 - [44] «DET110 - HIGH-SPEED SILICON DETECTOR», Newton, 2005.
 - [45] E. Tutorials, «555 Oscillator Tutorial». [Em linha]. Disponível em: https://www.electronics-tutorials.ws/waveforms/555_oscillator.html. [Acedido: 05-Ago-2019].
 - [46] S. HYMEL, «Alternating Current (AC) vs. Direct Current (DC)». [Em linha]. Disponível em: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/alternating-current-ac-vs-direct-current-dc/alternating-current-ac>. [Acedido: 03-Jul-2019].
 - [47] J. K. Roberge e K. H. Lundberg, *Operational Amplifiers : Theory and Practice*, Second Edi. Massachusetts, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2007.
 - [48] E. S. Gómez, *Piezoelectric Ceramics*. Rijeka, Croatia: Sciyo, 2010.
 - [49] W. G. Cady, *Piezoelectricity: an introduction to the theory and applications of electromechanical phenomena in crystals, Volume 2*. Michigan: Dover Publications, 1964.
 - [50] G. Gasparotto, A. Z. Simões, M. A. Zaghe, L. Perazolli, J. A. Varela, e E. Longo, «Síntese e caracterização da cerâmica PZT dopada com íons bário», *Cerâmica*, vol. 49, n. 310, pp. 110–115, 2003.
 - [51] B. Tunaboylu, P. Harvey, S. Esener, e S. Diego, «Microstructure of magnetron sputtered PLZT thin films on sapphire», n. April, 1998.
 - [52] Y. Yu, R. N. Singh, Y. Yu, e R. N. Singh, «Effect of composition and temperature on field-

induced properties in the lead strontium zirconate titanate system Effect of composition and temperature on field-induced properties in the lead strontium zirconate titanate system», vol. 7249, 2000.

- [53] C. Bedoya, C. Muller, J. Baudour, V. Madigou, M. Anne, e M. Roubin, «Sr-doped PbZr 1 –», vol. 75, pp. 43–52, 2000.
- [54] P. I. Custódio, «Desenvolvimento de heterojunções híbridas nanoestruturadas para aplicação em células solares», Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 2016.
- [55] P. D. A. Farinha, «Desenvolvimento de dispositivos de conversão e armazenamento de carga utilizando filmes finos de PAZO», Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 2016.
- [56] P. Ribeiro, «Caracterização dielétrica e eletroóptica do copolímero acrílico funcionalizado com o cromóforo 4-[N-etil-N-(2-hidroxietil)]amino-2-cloro-4-nitro-azobenzeno», Tese de Doutoramento, Universidade de São Paulo, 1999.

ANEXO

Material Data

SPECIFIC PARAMETERS OF THE STANDARD MATERIALS

Physical and dielectric properties	Unit	Soft PZT materials						Hard PZT materials				Lead-free materials	
		PICT51	PICT55	PICT55	PICT53	PICT52	PICT81	PICT41	PICT41	PICT300	PICT110	PICT050*	PICT700*
Density	ρ	7.60	7.60	7.60	7.60	7.70	7.80	7.80	7.80	7.80	5.50	4.7	5.6
Cure temperature	T_c	250	350	345	160	340	330	295	270	370	150	>800	200*
Relative permittivity in the polarization direction	ϵ_p/ϵ_0	2400	1750	1450	4200	1250	1200	1250	1650	1050	950	60	700
1 to polarity	ϵ_p/ϵ_0	1900	1650	1400			1500	1500	1550	950	95		
Dielectric loss factor	$\tan \delta$	20	20	20	30	15	3	5	5	3	15	<1	30
Electromechanical properties													
Coupling factor	k_p	0.62	0.62	0.62	0.62	0.48	0.56	0.55	0.50	0.48	0.30		0.15
	k_d	0.53	0.47	0.48			0.46	0.48	0.46	0.43	0.42		0.40
	k_{33}	0.28	0.25	0.25			0.32	0.31	0.32	0.25	0.18		
	k_{32}	0.69	0.69	0.69		0.58	0.66	0.66	0.64	0.46			
	k_{31}	0.66					0.63	0.67	0.63	0.32			
Piezoelectric charge coefficient	d_{33}	-210	-190	-165			-120	-140	-130	-80	-50		
	d_{31}	500	400	360	600	300	265	310	290	155	120	40	120
	d_{32}	550	550				475	475	265	195		80	
Piezoelectric voltage coefficient	g_{33}	-11.5	-11.3	-12.9	16	25	25	29	21	16	-11.9		
	g_{31}	22	25	27									
Acousto-mechanical properties													
Frequency coefficients	N_p	1950	2000	1950	1980	2250	2270	2250	2190	2350	3150		
	N_s	1500	1420	1500			1640	1610	1580	1700	2200		
	N_z	1750	1780	1780	1980	1920	2010	1925	1550	1700	2500		
	N_x	1950	2000	1990			2110	2060	2140	2100			
Elastic compliance coefficient	S_{11}^E	15.0	16.1	15.6			11.8	12.4	12.6	11.1			
	S_{12}^E	19.0	20.7	18.7			14.2	13.0	14.3	11.8			
Elastic stiffness coefficient	C_{11}^D	10.0	10.0	11.1	50	100	16.6	15.8	13.8	16.4	250		
Mechanical quality factor	Q_m	100	80	80			2000	1500	1200	1400			
Temperature stability													
Temperature coefficient of ϵ_p	$\frac{1}{\epsilon_p} \frac{d\epsilon_p}{dT}$	7K/5%	10%/K	6	4	6	5	2	3	5	2		
Time stability (relative change of the parameter per decade of time in %)				-1.0	-2.0					-4.0		-5.0	
Relative permittivity	ϵ_r			-1.0	-2.0						-8.0		
Coupling factor	k_t												

Recommended operating temperature:
50 % of Cure temperature.
1) Crystalline material
2) Preliminary data, subject to change
3) Maximum operating temperature

The following values are valid approximations for all PZT materials from PI Ceramio:

Specific heat capacity:
WK – approx. 350 J kg⁻¹ K⁻¹
WK – approx. 350 J kg⁻¹ K⁻¹

Specific thermal conductivity:
WL – approx. 1.1 W m⁻¹ K⁻¹
Poisson's ratio (lateral contraction):
 σ – approx. 0.34

Coefficient of thermal expansion:
 α_0 – approx. 4 to 6 $\times 10^{-6}$ K⁻¹
(in the polarization direction, at room temperature)
 α_1 – approx. 4 to 8 $\times 10^{-6}$ K⁻¹
(perpendicular to the polarization direction, at room temperature)

Static compressive strength:
> 600 MPa

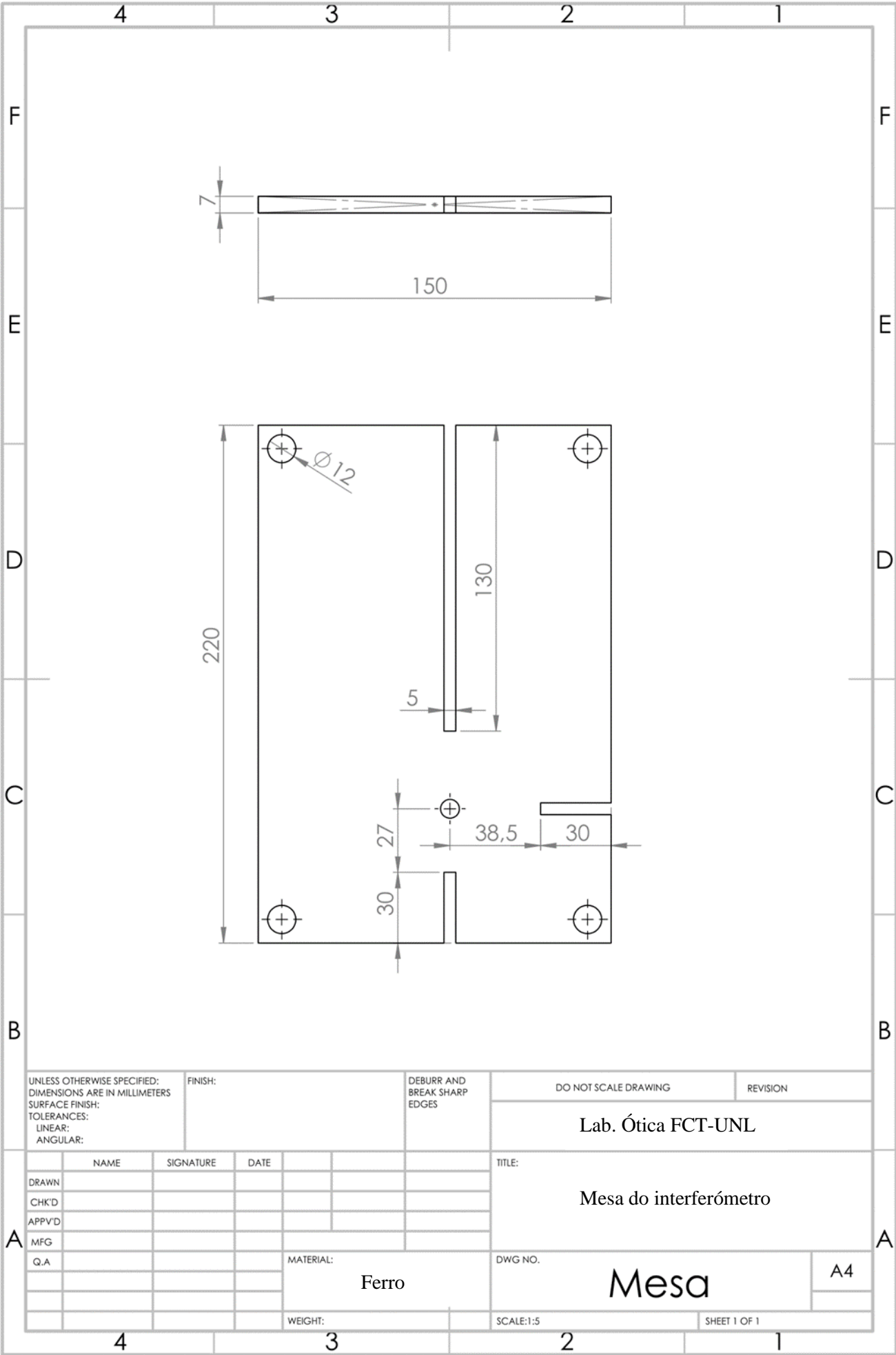
The data was determined using test pieces with the geometric dimensions laid down in EN 50324-2 standard and are typical values.

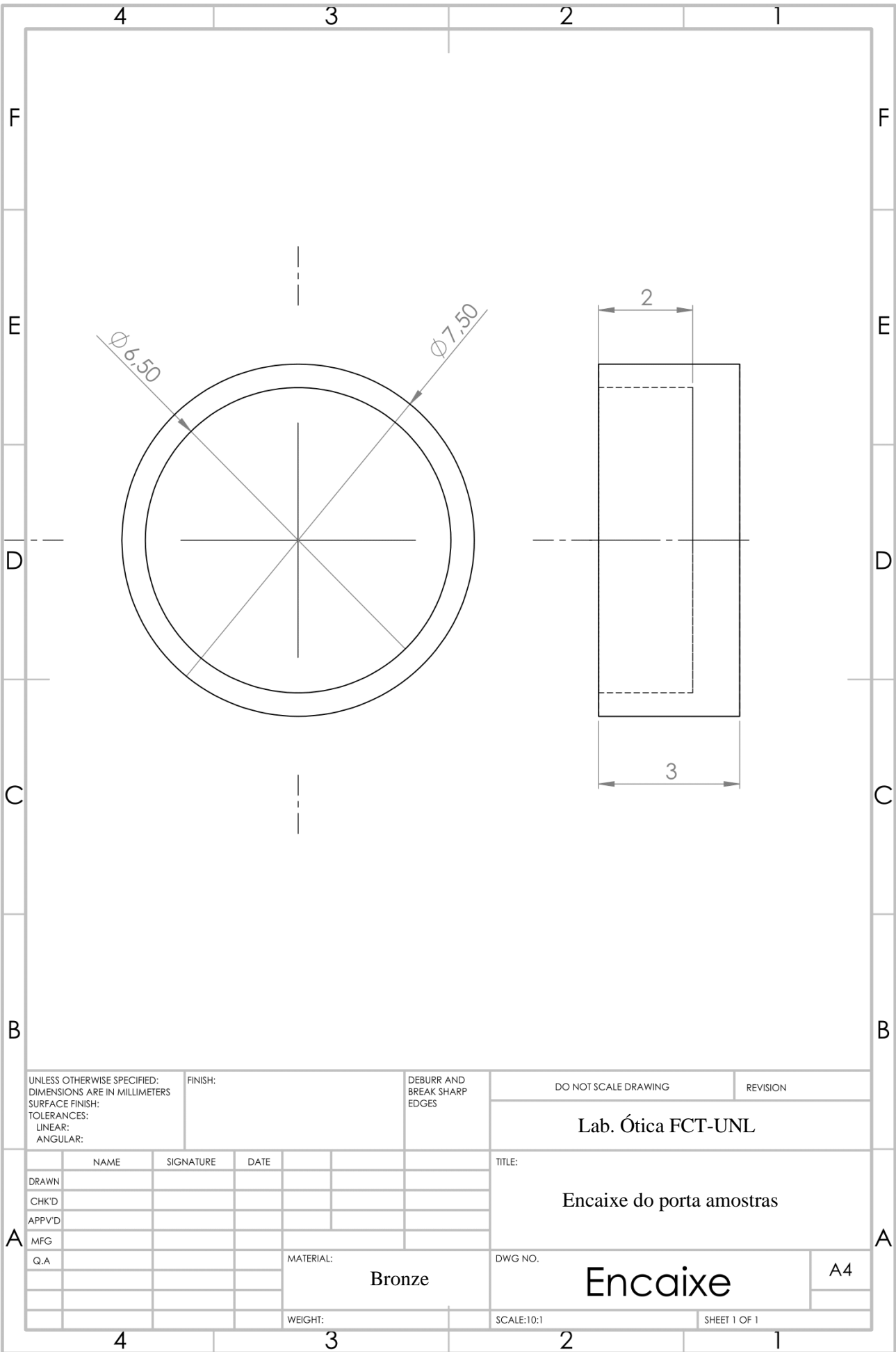
All data provided was determined 24 h to 48 h after the time of polarization at an ambient temperature of 22 \pm 2 °C.

A complete coefficient matrix of the individual materials is available on request. If you have any questions about the interpretation of the material characteristics, please contact PI Ceramio (info@piceramic.de).

APÊNDICE

Desenhos técnicos





UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

Lab. Ótica FCT-UNL

	NAME	SIGNATURE	DATE			
DRAWN						
CHK'D						
APPV'D						
MFG						
Q.A						

TITLE:

Encaixe do porta amostras

MATERIAL:

Bronze

DWG NO.

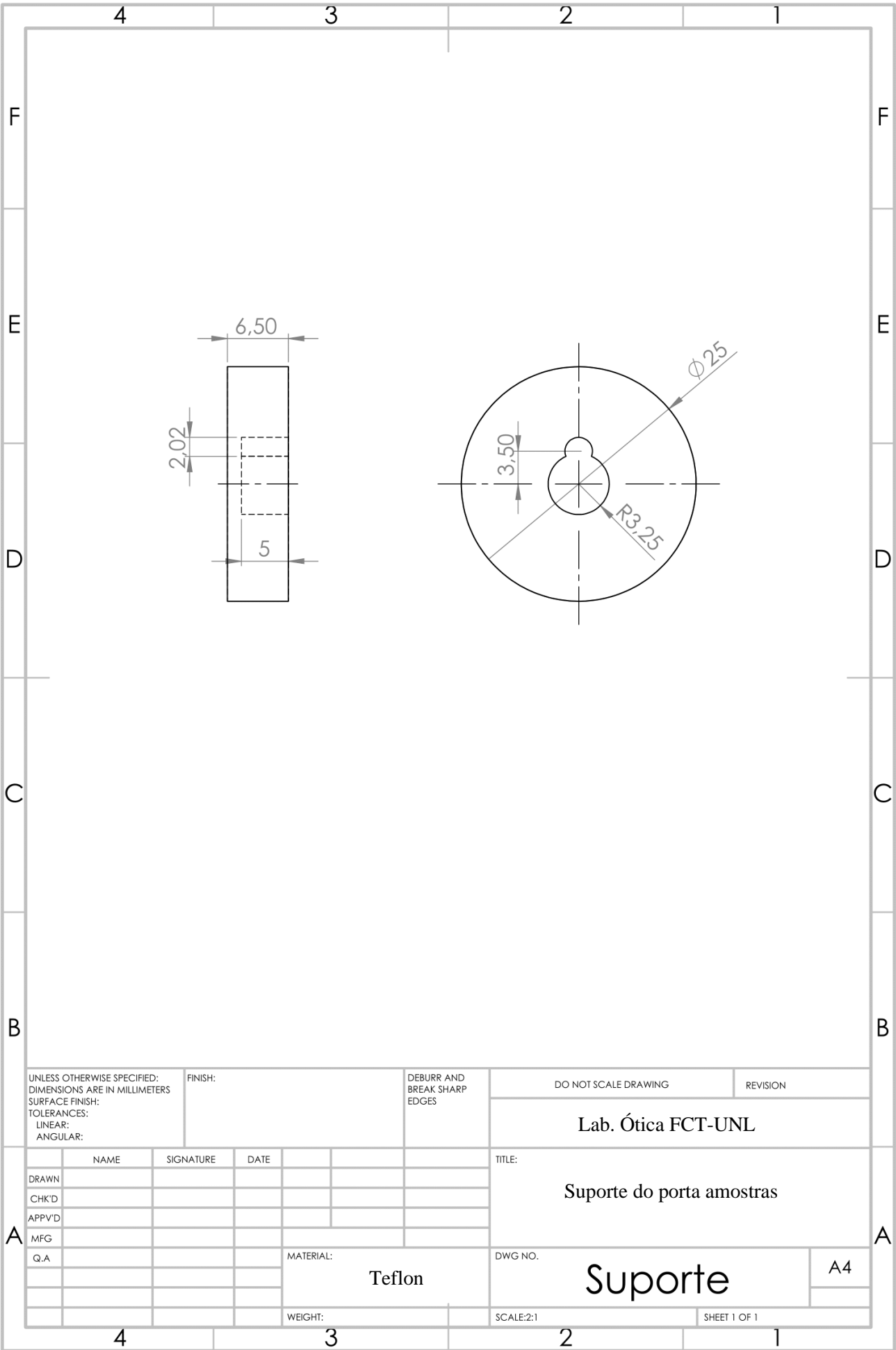
Encaixe

A4

WEIGHT:

SCALE:10:1

SHEET 1 OF 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

Lab. Ótica FCT-UNL

Suporte do porta amostras

Suporte

A4

MATERIAL:
Teflon

DWG NO.

WEIGHT:

SCALE:2:1

SHEET 1 OF 1